

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté des sciences appliquées
Département de génie civil

**CARACTÉRISATION DE LA RIGIDITÉ ET
DE LA RÉSISTANCE À LA FATIGUE DES ENROBÉS**

Mémoire de maîtrise en sciences appliquées
Spécialité : génie civil

Félix DOUCET

Sherbrooke, Québec, Canada
Octobre 1999

Résumé

Un projet a été entrepris en 1997 pour développer une procédure pour la caractérisation en laboratoire de la rigidité et de la résistance à la fatigue des enrobés à l'aide de l'essai de flexion de poutres avec chargement appliqué aux tiers points. Avant de débiter la caractérisation de différents enrobés, une procédure pour la fabrication des poutres nécessaires à l'essai de flexion a été élaborée à l'aide d'un compacteur de plaque de type LCPC. Cette procédure permet de fabriquer des poutres d'enrobé représentatives des conditions qui prévalent lors de la mise en œuvre sur la route et qui présentent une faible variabilité entre elles.

Par la suite, des enrobés de base de type ESG-14 et GB-20 ont été caractérisés en fonction de la température. Cette étude a permis de développer la méthode de caractérisation et d'analyse des données. L'essai de balayage de fréquence avec un faible niveau de déformation a été retenu pour la caractérisation de la rigidité et de l'angle de phase. L'essai de fatigue avec deux niveaux de déformation et trois répliques par niveau a été retenu pour la caractérisation de la résistance à la fatigue. De plus, il a été observé que l'évolution de la résistance à la fatigue des enrobés à basse et haute température semble différer de ce qui est généralement admis dans la littérature. De plus, une définition alternative de la rupture par fatigue en laboratoire a été développée parallèlement à la définition de la rupture selon la norme. Cette définition semble mieux tenir compte de l'influence de la rhéologie de l'enrobé sur sa résistance à la fatigue.

Finalement, la caractérisation d'enrobés MB-16 provenant d'un site expérimental de suivi de performance a également été effectuée. La caractérisation en laboratoire a semblé ne reproduire qu'en partie le comportement observé sur la route. Par ailleurs, l'angle de phase a été identifié comme un bon indicateur de la performance en fatigue d'un enrobé. Basé sur l'ensemble des résultats obtenus, des modèles généraux pour la prédiction de la rigidité, de l'angle de phase et de la résistance à la fatigue des enrobés ont été développés. Leur comparaison avec les modèles proposés dans la littérature a permis de vérifier la validité de la procédure de caractérisation proposée.

Remerciements

Je désire profiter de la publication de ce mémoire pour remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce projet. En particulier, je veux remercier les personnes suivantes pour leur contribution fortement appréciée.

En premier lieu, je tiens à remercier Anne-Marie Leclerc pour son implication dans le démarrage de ce projet qui sans son concours n'aurait certainement pas vu le jour. J'espère qu'elle conservera encore longtemps cette conviction en le rôle nécessaire de la recherche pour atteindre un niveau de performance acceptable sur le réseau routier québécois.

J'aimerais également remercier mes directeurs Claude Lupien et Pierre Langlois qui sont en grande partie responsable du bon déroulement du projet. Ils ont su me donner la latitude nécessaire pour mener ce projet à terme, tout en me faisant profiter de leur grande expertise. Je veux particulièrement remercier Claude pour son habilité à mettre les résultats en perspective ainsi que pour son encouragement et sa confiance en mes aptitudes. D'autre part, je veux remercier Pierre pour ce qu'il est, soit un farceur invétéré, mais surtout le « Père des enrobés modernes au Québec », ce dont il a su me faire profiter.

Je m'en voudrais de ne pas souligner le travail impeccable et fortement apprécié de l'équipe du laboratoire composée de Serge Charron, Pierre Pagé, Marc Perron, Denis Proteau et Jacques Samson. J'aimerais particulièrement souligner le travail de Marc Perron dont le professionnalisme et la minutie ont été des éléments clefs dans l'atteinte des objectifs de ce projet. J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler, mais aussi à m'amuser, avec vous « les gars ».

Il est également important de souligner l'influence de certains consultants lors du processus de réflexion. J'aimerais remercier Yves Savard pour son intérêt marqué et son implication soutenu dans l'analyse des résultats ainsi que Denis St-Laurent pour sa précieuse expertise en analyse de chaussée. J'aimerais également remercier Nelson Rioux pour ses sages conseils concernant l'orientation du projet.

Je suis également redevable à Yvan Tremblay et au personnel technique et de soutien du service des matériaux d'infrastructures pour leur disponibilité et leur générosité. Je veux spécialement souligner le support moral et technique gentiment prodigé par mes voisins de bureaux Marina Beaudoin et Bruno Marquis. Je désire également remercier Yannick Bissonnette pour son coup de pouce dans l'exécution et l'analyse des derniers essais de ce projet et Marie-Andrée Larouche pour son travail sur l'annexe II.

En dernier lieu, je voudrais remercier ceux qui font une différence depuis le début de mon cheminement personnel, soit mon père Alvin, ma mère Claire et mon frère Olivier pour leur amour et leur fierté inconditionnels en tout ce que j'entreprends et ce que j'entreprendrai.

Et finalement, j'aimerais exprimer à quel point je suis redevable à ma conjointe Isabelle Auger qui est mon pilier moral pour le meilleur et pour le pire depuis tant d'années. Je la remercie pour son amour sincère qui me permet de toujours aller plus loin. Je veux également la remercier pour son rôle de conseillère en statistique et ajouter que « Chérie, j'ai finalement fini ma maîtrise ».

1.	INTRODUCTION	1
2.	REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1	Enrobés	3
2.1.1	Viscoélasticité	4
2.1.2	Linéarité	6
2.2	Rigidité des enrobés	7
2.3	Dégradation par fatigue des enrobés.....	8
2.4	Influence de l'environnement.....	11
2.4.1	Trafic	11
2.4.2	Climat	12
2.5	Méthodes d'essais.....	13
2.5.1	Rigidité	14
2.5.2	Résistance à la fatigue	15
2.5.3	Préparation des poutres	20
2.6	Caractérisation de la rigidité en laboratoire	20
2.6.1	Modélisation.....	20
2.6.2	Caractérisation.....	23
2.6.3	Représentation.....	23
2.7	Caractérisation de la résistance à la fatigue en laboratoire	26
2.7.1	Modélisation.....	27
2.7.2	Modes de sollicitation	29
2.7.3	Caractérisation.....	32
2.7.4	Évolution de certains paramètres	33
2.7.5	Période de repos	38
2.8	Influence des paramètres de formulation.....	39
2.8.1	Compacité.....	39

2.8.2	Nature du bitume	39
2.8.3	Teneur en bitume.....	39
2.8.4	Teneur en fines	40
2.8.5	Angularité.....	40
2.8.6	Granulométrie.....	40
2.8.7	Fibres.....	40
2.9	Influence des paramètres environnementaux	41
2.9.1	Température	41
2.9.2	Fréquence	41
2.9.3	Vieillessement.....	43
2.10	Modèles de la littérature.....	43
2.10.1	Rigidité	43
2.10.2	Résistance à la fatigue	48
2.10.3	Bitume	53
3.	PLAN DU PROJET ET MÉTHODOLOGIE	55
3.1	Plan du projet.....	55
3.1.1	Fabrication des poutres.....	55
3.1.2	Rigidité et résistance à la fatigue des enrobés de base ESG-14 et GB-20.....	56
3.1.3	Rigidité et résistance à la fatigue des enrobés MB-16 de l'autoroute 10.	56
3.1.4	Modèles généraux et comparaison avec les modèles de la littérature	57
3.2	Méthodologie.....	57
3.2.1	Compacteur de plaques	57
3.2.2	Essai de flexion de poutre aux tiers points	59
3.2.3	Définition alternative de la rupture par fatigue	63
3.2.4	Définition alternative de la rigidité initiale.....	70
4.	ÉTUDE DE LA FABRICATION DES POUTRES	72
4.1	Méthodologie.....	72
4.2	Analyse des résultats.....	74

4.3	Discussion	77
4.3.1	Énergie de compactage.....	77
4.3.2	Découpage des poutres.....	78
4.4	Recommandations	79
5.	CARACTÉRISATION DES ENROBÉS DE BASE ESG-14 ET GB-20	80
5.1	Description des enrobés	80
5.1.1	Granulométrie.....	80
5.1.2	Bitume	82
5.2	Méthodologie	83
5.2.1	Rigidité et angle de phase.....	83
5.2.2	Résistance à la fatigue	84
5.3	Caractérisation de la rigidité	84
5.3.1	Résultats des essais de fatigue.....	84
5.3.2	Résultats des essais de balayage de fréquence	88
5.3.3	Comparaison entre l'essai de fatigue et l'essai de balayage de fréquence	90
5.3.4	Évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue	91
5.4	Caractérisation de l'angle de phase.....	99
5.4.1	Résultats des essais de fatigue.....	99
5.4.2	Résultats des essais de balayage de fréquence	101
5.4.3	Comparaison entre l'essai de fatigue et l'essai de balayage de fréquence	103
5.4.4	Analyse du module complexe	104
5.4.5	Évolution de l'angle de phase lors de l'essai de fatigue	106
5.5	Caractérisation de la résistance à la fatigue	110
5.5.1	Équations de fatigue	110
5.5.2	Essais supplémentaires à basse température.....	118
5.5.3	Modèles de fatigue généraux.....	120
5.6	Recommandations.....	123
5.6.1	Rigidité et angle de phase.....	123
5.6.2	Résistance à la fatigue	124

5.6.3	Influence de la température	127
6.	CARACTÉRISATION DES ENROBÉS MB-16 DE L'AUTOROUTE 10.....	128
6.1	Description du site.....	128
6.2	Suivi de performance.....	128
6.3	Description des enrobés	129
6.3.1	Granulométrie.....	130
6.3.2	Bitume	130
6.4	Méthodologie	131
6.5	Caractérisation de la rigidité	132
6.5.1	Résultats des essais de balayage de fréquence	133
6.5.2	Évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue	135
6.6	Caractérisation de l'angle de phase.....	139
6.6.1	Résultats des essais de balayage de fréquence	139
6.6.2	Analyse du module complexe	142
6.6.3	Évolution de l'angle de phase lors de l'essai de fatigue	144
6.7	Caractérisation de la résistance à la fatigue	145
6.7.1	Équations de fatigue	145
6.7.2	Classement des enrobés.....	150
6.7.3	Modèles de fatigue généraux pour la température critique et effective.....	153
6.7.4	Modèles de fatigue généraux.....	155
6.8	Recommandations.....	156
6.8.1	Rigidité et angle de phase.....	156
6.8.2	Résistance à la fatigue	157
6.8.3	Classement des enrobés en fonction de leur résistance à la fatigue.....	159
6.8.4	Essai de flexion de poutres aux tiers points.....	160
7.	DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES GLOBAUX ET COMPARAISON AVEC LES MODÈLES DE LA LITTÉRATURE.....	162

7.1	Modèles globaux.....	162
7.1.1	Influence du bitume.....	162
7.1.2	Rigidité et angle de phase.....	165
7.1.3	Résistance à la fatigue	166
7.2	Étude comparative avec les modèles de la littérature	167
7.2.1	Rigidité.....	167
7.2.2	Résistance à la fatigue	174
7.3	Recommandations.....	201
7.3.1	Modèles généraux	201
7.3.2	Modèles de la littérature	202
8.	CONCLUSION	204
	RÉFÉRENCES	206

ANNEXE I : Procédure pour l'essai de flexion de poutre aux tiers points.

ANNEXE II : Procédure pour la caractérisation de la rigidité et de la résistance à la fatigue des enrobés.

ANNEXE III : Données sur les enrobés employés pour l'étude de la fabrication des poutres.

ANNEXE IV : Formulation des enrobés de base ESG-14 et GB-20.

ANNEXE V : Résultats de la caractérisation des enrobés de base ESG-14 et GB-20.

ANNEXE VI : Formulation des enrobés MB-16 de l'autoroute 10.

ANNEXE VII : Résultats de la caractérisation des enrobés MB-16 de l'autoroute 10.

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 –	Réaction élastique et visqueuse sous l'application d'une même contrainte.	5
Figure 2.2 –	Réaction viscoélastique sous l'application d'une contrainte [Von Quintus 1994].....	6
Figure 2.3 -	Relation contrainte-déformation linéaire et non-linéaire.	7
Figure 2.4 -	Influence de la température et du temps de chargement sur la rigidité [Brown 1995].	8
Figure 2.5 -	Zones de sollicitation dans un enrobé lors du passage d'un véhicule.	9
Figure 2.6 -	Sollicitation longitudinale (a) et transversale (b) de l'enrobé [De La Roche 1996b].	11
Figure 2.7 -	Distribution de la charge dans un enrobé en fonction de sa rigidité.....	12
Figure 2.8 –	Essai de tension indirecte [Kennedy 1977].	17
Figure 2.9 –	Essai de flexion avec chargement appliqué à l'extrémité d'une poutre trapézoïdale [Moutier 1990].....	18
Figure 2.10 –	Essai de flexion avec chargement appliqué aux tiers points d'une poutre rectangulaire [Bronstein & Sousa 1995].	19
Figure 2.11 -	Distribution de la déformation lors d'un essai de flexion de poutre trapézoïdale chargée à son extrémité (2 points) et rectangulaire chargée aux tiers points (4 points) [Pronk 1997].	19
Figure 2.12 -	Représentation du module complexe sous sa forme polaire.	21
Figure 2.13 -	Cycle de sollicitation sinusoïdale sur un matériau viscoélastique.....	22
Figure 2.14 -	Courbes isothermes de rigidité [Rivière 1996].	24
Figure 2.15 -	Courbe maîtresse de module complexe [Rivière 1996].	25
Figure 2.16 -	Représentation du module complexe dans un plan de Black [Rivière 1996].	26
Figure 2.17 -	Courbe de Whöler.	28
Figure 2.18 –	Évolution de la déformation et de la contrainte en fonction du mode de sollicitation.	30
Figure 2.19 -	Classement de la résistance à la fatigue en fonction du mode de sollicitation [Brown 1978].	30
Figure 2.20 -	Évolution de la rigidité lors d'un essai de fatigue [Di Benedetto & al 1996].	34
Figure 2.21 -	Détermination de la rigidité initiale sans tenir compte de l'échauffement [Kong Kam Wa & al 1997].....	35

Figure 2.22 -	Évolution de l'angle de phase lors d'un essai de fatigue en parallèle avec l'évolution de la rigidité [Reese 1997].....	36
Figure 2.23 -	Boucle d'hystérésis [Rivière 1996].	37
Figure 2.24 -	Évolution de l'énergie dissipée lors d'un essai de fatigue [Pronk 1997].....	37
Figure 2.25 -	Temps de chargement lors du passage d'un véhicule en fonction de la profondeur pour un chargement de forme carrée [McLean 1974].	42
Figure 2.26 -	Temps de chargement lors du passage d'un véhicule en fonction de la profondeur pour un chargement de forme triangulaire et sinusoïdale [Barksdale 1971].	42
Figure 2.27 -	Nomographe pour déterminer la rigidité des bitumes [Van der Poel 1954]	45
Figure 2.28 -	Nomographe pour déterminer la rigidité des enrobés [Shell 1978].	46
Figure 2.29 -	Variation de λ en fonction de la teneur en asphaltène α dans le bitume [Francken & Verstraeten 1974].	49
Figure 3.1 -	Photo du compacteur de plaques de type LCPC.....	58
Figure 3.2 -	Photo de l'appareil CS 7800.	60
Figure 3.3 -	Module d'essai de flexion de poutres aux tiers points.	61
Figure 3.4 -	Paramètres mesurés lors de l'essai de flexion de poutre aux tiers points et distribution de l'effort de cisaillement et du moment fléchissant sur la poutre.....	62
Figure 3.5 -	Évolution de l'angle de phase lors d'un essai de fatigue.....	64
Figure 3.6 -	Évolution de l'énergie dissipée cumulée lors d'un essai de fatigue.....	65
Figure 3.7 -	Évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue.....	66
Figure 3.8 -	Détermination de la rupture basée sur l'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue.....	67
Figure 3.9 -	Détermination de la rupture basée sur l'évolution de l'angle de phase lors de l'essai de fatigue.....	68
Figure 3.10 -	Détermination de la rupture basée sur l'évolution de l'énergie dissipée cumulée lors de l'essai de fatigue.	69
Figure 3.11 -	Extrapolation de la rigidité initiale à partir de l'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue.....	71
Figure 4.1 -	Plan de carottage des plaques.	73
Figure 4.2 -	Distribution de la compacité en longueur et hauteur dans une plaque d'enrobé EB-10S pour une faible énergie de compactage.	74

Figure 4.3 –	Distribution de la compacité en longueur et hauteur dans une plaque d'enrobé EB-20 pour une faible énergie de compactage.	75
Figure 4.4 –	Distribution de la compacité en longueur et hauteur dans une plaque d'enrobé EG-10 pour une faible énergie de compactage.	75
Figure 4.5 –	Écart entre le mode de compactage à haut niveau et à bas niveau d'énergie pour l'enrobé EB-10S.	76
Figure 4.6 –	Plan de découpage des poutres dans la plaque.	79
Figure 5.1 –	Granulométrie des enrobés ESG-14.	81
Figure 5.2 –	Granulométrie des enrobés GB-20.	81
Figure 5.3 –	Distribution de S_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	85
Figure 5.4 –	Isothermes de E pour les enrobés GB-20.	88
Figure 5.5 –	Isochrones de E pour les enrobés GB-20.	88
Figure 5.6 –	Distribution de S_{50} et E en fonction de la température pour les enrobés GB-20.	90
Figure 5.7 –	Description de l'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue par S_{50} , S_0 , $S_{\frac{1}{2}}$ et S_r	92
Figure 5.8 –	Distribution de S_0 et S_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	93
Figure 5.9 –	Histogramme des rapports S_0/S_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	93
Figure 5.10 –	Distribution de $S_{\frac{1}{2}}$ et S_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	94
Figure 5.11 –	Distribution de S_r et S_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	95
Figure 5.12 –	Histogramme des rapports S_r/S_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	96
Figure 5.13 –	Distribution de $S_{\frac{1}{2}}$ et S_0 en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	97
Figure 5.14 –	Histogramme des rapports $S_{\frac{1}{2}}/S_0$ en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	97
Figure 5.15 –	Distribution de S_r et S_0 en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	98
Figure 5.16 –	Histogramme des rapports S_r/S_0 en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	99
Figure 5.17 –	Distribution de ϕ_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	100

Figure 5.18 –	Isothermes de φ pour les enrobés GB-20.	101
Figure 5.19 –	Isochrones de φ pour les enrobés GB-20.....	102
Figure 5.20 –	Distribution de ϕ_{50} et φ en fonction de la température pour les enrobés GB-20.	103
Figure 5.21 –	Histogramme des rapports ϕ_{50}/φ en fonction de la température pour les enrobés GB-20.	104
Figure 5.22 –	Représentation de Black en fonction de S_{50} et ϕ_{50} pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	104
Figure 5.23 –	Représentation de Black en fonction de E et φ pour l'enrobé GB-20.	105
Figure 5.24 –	Représentation de Black avec E et φ ainsi que S_{50} et ϕ_{50} pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	106
Figure 5.25 –	Description de l'évolution de l'angle de phase lors de l'essai de fatigue par ϕ_{50} , $\phi_{1/2}$ et ϕ_r	107
Figure 5.26 –	Distribution de $\phi_{1/2}$ et ϕ_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	108
Figure 5.27 –	Histogramme des rapports $\phi_{1/2}/\phi_{50}$ en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	108
Figure 5.28 –	Distribution de ϕ_r et ϕ_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	109
Figure 5.29 –	Histogramme des rapports ϕ_r/ϕ_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	109
Figure 5.30 –	Représentation des relations de Whöler pour l'enrobé ESG-14 formulé avec un bitume conventionnel.....	112
Figure 5.31 –	Représentation des relations de Whöler pour l'enrobé ESG-14 formulé avec un bitume polymère.....	113
Figure 5.32 –	Représentation des relations de Whöler pour l'enrobé GB-20 formulé avec un bitume conventionnel.....	113
Figure 5.33 –	Représentation des relations de Whöler pour l'enrobé GB-20 formulé avec un bitume polymère.....	114
Figure 5.34 –	Distribution de la pente des relations de Whöler en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	115
Figure 5.35 –	Distribution de l'ordonnée à l'origine des relations de Whöler en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	116
Figure 5.36 –	Distribution de ε_6 en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	118
Figure 5.37 –	Distribution du nombre de cycles pour un niveau de déformation fixe en fonction de la température pour les enrobés EGS-14.	119

Figure 5.38 –	Distribution du nombre de cycles pour un niveau de déformation fixe en fonction de la température pour les enrobés GB-20.....	119
Figure 6.1 –	Granulométrie des enrobés MB-16.....	130
Figure 6.2 –	Isothermes de E pour les enrobés MB-16.	133
Figure 6.3 –	Distribution de S_{50} et E en fonction de la température pour les enrobés MB-16.	135
Figure 6.4 –	Histogramme des rapports S_o/S_{50} en fonction de la température pour les enrobés MB-16.	136
Figure 6.5 –	Histogramme des rapports S_r/S_{50} en fonction de la température pour les enrobés MB-16.	137
Figure 6.6 –	Histogramme des rapports $S_{1/2}/S_o$ en fonction de la température pour les enrobés MB-16.	138
Figure 6.7 –	Histogramme des rapports S_r/S_o en fonction de la température pour les enrobés MB-16.	139
Figure 6.8 –	Isothermes de ϕ pour les enrobés MB-16.	140
Figure 6.9 –	Distribution de ϕ_{50} et ϕ en fonction de la température pour les enrobés MB-16.....	141
Figure 6.10 –	Représentation de Black en fonction de E et ϕ pour les enrobés MB-16.....	142
Figure 6.11 –	Représentation de Black avec E et ϕ ainsi que S_{50} et ϕ_{50} pour les enrobés MB-16.....	143
Figure 6.12 –	Représentation de Black en fonction de E et ϕ pour les enrobés GB-20 et MB-16.....	143
Figure 6.13 –	Distribution de $\phi_{1/2}$ et ϕ_{50} en fonction de la température pour les enrobés MB-16.....	144
Figure 6.14 –	Représentation des relations de Whöler $N_{1/2}$ pour les enrobés MB-16.....	146
Figure 6.15 –	Représentation des relations de Whöler N_r pour les enrobés MB-16.....	147
Figure 6.16 –	Histogramme des pentes en fonction du type de bitume pour les enrobés MB-16.....	148
Figure 6.17 –	Histogramme des ordonnées en fonction du type de bitume pour les enrobés MB-16.	148
Figure 6.18 –	Histogramme des ε_6 en fonction du type de bitume pour les enrobés MB-16.....	150
Figure 7.1 –	Nomographe pour déterminer la rigidité des bitumes [Van der Poel 1954]	169
Figure 7.2 –	Nomographe pour déterminer la rigidité des enrobés [Shell 1978].	170
Figure 7.3 –	Histogramme des valeurs de E mesurées et estimées à 5°C en fonction du type d'enrobé pour les enrobés GB-20 et MB-16.....	173
Figure 7.4 –	Histogramme des valeurs de E mesurées et estimées à 15°C et 10 Hz en fonction du type d'enrobé pour les enrobés GB-20 et MB-16.	173

Figure 7.5 –	Droites de fatigue selon le modèle Shell à 5 et 15°C avec la valeur de rigidité déterminée selon l’approche proposée par Shell pour les enrobés MB-16.....	176
Figure 7.6 –	Droites de fatigue selon le modèle Shell à 5 et 15°C avec la valeur de rigidité dynamique en flexion pour les enrobés MB-16.....	177
Figure 7.7 –	Droites de fatigue selon le modèle de l’Asphalt Institute à 5 et 15°C avec la valeur de rigidité déterminée selon l’approche proposée par Shell pour les enrobés MB-16.	179
Figure 7.8 –	Droites de fatigue selon le modèle de l’Asphalt Institute à 5°C avec la valeur de rigidité dynamique en flexion pour les enrobés GB-20 et MB-16.....	180
Figure 7.9 –	Droites de fatigue selon le modèle de l’Asphalt Institute à 15°C avec la valeur de rigidité dynamique en flexion pour les enrobés GB-20 et MB-16.	180
Figure 7.10 –	Droites de fatigue selon le modèle de Myre à 5°C avec la valeur de rigidité dynamique en flexion pour les enrobés GB-20 et MB-16.	183
Figure 7.11 –	Droites de fatigue selon le modèle de Myre à 15°C avec la valeur de rigidité dynamique en flexion pour les enrobés GB-20 et MB-16.	183
Figure 7.12 –	Droites de fatigue selon le modèle de SHRP à 5°C avec la valeur de rigidité dynamique en flexion pour les enrobés GB-20 et MB-16.	185
Figure 7.13 –	Droites de fatigue selon le modèle de SHRP à 15°C avec la valeur de rigidité dynamique en flexion pour les enrobés GB-20 et MB-16.....	186
Figure 7.14 –	Droites de fatigue individuelles à 5°C pour les enrobés GB-20 et MB-16.....	188
Figure 7.15 –	Droites de fatigue individuelles à 15°C pour les enrobés GB-20 et MB-16.....	188
Figure 7.16 –	Droites de fatigue générales à 5°C pour les enrobés GB-20 et MB-16.	189
Figure 7.17 –	Droites de fatigue générales à 15°C pour les enrobés GB-20 et MB-16.	190
Figure 7.18 –	Droites de fatigue globales à 5°C pour les enrobés GB-20 et MB-16.	191
Figure 7.19 –	Droites de fatigue globales à 15°C pour les enrobés GB-20 et MB-16.	191
Figure 7.20 –	Droites de fatigue individuelles, générales et globales pour l’enrobé GB-20 formulé avec un bitume conventionnel.	192
Figure 7.21 –	Droites de fatigue individuelles, générales et globales pour l’enrobé GB-20 formulé avec un bitume modifié aux polymères.....	193
Figure 7.22 –	Droites de fatigue individuelles, générales et globales pour l’enrobé MB-16 formulé avec un bitume 80/100.....	193
Figure 7.23 –	Droites de fatigue individuelles, générales et globales pour l’enrobé MB-16 formulé avec un bitume MG 90.....	194
Figure 7.24 –	Droites de fatigue individuelles, générales et globales pour l’enrobé MB-16 formulé avec un bitume 150/200.....	194

Figure 7.25 –	Droites de fatigue individuelles, générales et globales pour l'enrobé MB-16 formulé avec un bitume MG 175.....	195
Figure 7.26 –	Différents modèles de fatigue à 15°C pour l'enrobé GB-20 formulé avec un bitume conventionnel.....	197
Figure 7.27 –	Différents modèles de fatigue à 15°C pour l'enrobé GB-20 formulé avec un bitume polymère.....	197
Figure 7.28 –	Différents modèles de fatigue à 15°C pour l'enrobé MB-16 formulé avec un bitume 80/100.	198
Figure 7.29 –	Différents modèles de fatigue à 15°C pour l'enrobé MB-16 formulé avec un bitume MG 90.....	198
Figure 7.30 –	Différents modèles de fatigue à 15°C pour l'enrobé MB-16 formulé avec un bitume 150/200.	199
Figure 7.31 –	Différents modèles de fatigue à 15°C pour l'enrobé MB-16 formulé avec un bitume MG 175.....	199

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 - Composantes qui influencent principalement le comportement de l'enrobé [<i>inspiré de Goodrich 1991</i>].	8
Tableau 2.2 - Méthodes d'essai pour caractériser la rigidité d'un enrobé.	15
Tableau 2.3 - Catégories d'essai pour l'étude de la fatigue.	16
Tableau 2.4 - Routine d'essai rapide proposée par le programme SHRP.	33
Tableau 3.1 - Dimensions des moules disponibles pour le compactage.	59
Tableau 5.1 - Teneur en vides (%) mesurée par l'essai à la PCG.	82
Tableau 5.2 - Description volumétrique des enrobés ESG-14 et GB-20.	82
Tableau 5.3 - Classes PG des bitumes employés pour la formulation des enrobés ESG-14 et GB-20.	83
Tableau 5.4 - Modèles de rigidité S_{50} (MPa) en fonction de la température T (°C) pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	87
Tableau 5.5 - Modèles de rigidité E (MPa) en fonction de la température T (°C) et de la fréquence f_r (Hz) pour les enrobés GB-20.	89
Tableau 5.6 - Modèles d'angle de phase ϕ (°) en fonction de la température T (°C) et de la fréquence f_r (Hz) pour les enrobés GB-20.	102
Tableau 5.7 - Relations de Whöler en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$) pour l'enrobé ESG-14 formulé avec un bitume conventionnel.	110
Tableau 5.8 - Relations de Whöler en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$) pour l'enrobé ESG-14 formulé avec un bitume polymère.	111
Tableau 5.9 - Relations de Whöler en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$) pour l'enrobé GB-20 formulé avec un bitume conventionnel.	111
Tableau 5.10 - Relations de Whöler en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$) pour l'enrobé GB-20 formulé avec un bitume polymère.	111
Tableau 5.11 - Valeur de pente moyenne pour les relations de Whöler des enrobés ESG-14 et GB-20.	115
Tableau 5.12 - Valeurs de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$) estimées par $N_{1/2}$ pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	117
Tableau 5.13 - Valeurs de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$) estimées par N_r pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	117
Tableau 5.14 - Modèles de fatigue $N_{1/2}$ en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$) et de la température T (°C) pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	121

Tableau 5.15 –	Modèles de fatigue N_r en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$) et de la température T ($^{\circ}\text{C}$) pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	121
Tableau 5.16 –	Modèles de fatigue $N_{1/2}$ en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$) et de la rigidité E (MPa) pour les enrobés GB-20.	122
Tableau 5.17 –	Modèles de fatigue N_r en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$) et de la rigidité E (MPa) pour les enrobés GB-20.	122
Tableau 5.18 –	Valeurs de rigidité E (MPa) et d'angle de phase φ ($^{\circ}$) mesurées à 5 et 15°C et 10 Hz pour les enrobés GB-20.	124
Tableau 5.19 –	Modèle de rigidité E (MPa) en fonction de la température T ($^{\circ}\text{C}$) et de la fréquence f_r (Hz) pour les enrobés GB-20.	124
Tableau 5.20 –	Modèles de fatigue $N_{1/2}$ en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$), de la température T ($^{\circ}\text{C}$) ou de la rigidité E (MPa) pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	126
Tableau 5.21 –	Modèles de fatigue N_r en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$), de la température T ($^{\circ}\text{C}$) ou de la rigidité E (MPa) pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	126
Tableau 5.22 –	Valeurs de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$) estimées à 5 et 15°C et 10 Hz pour les enrobés ESG-14 et GB-20.	127
Tableau 6.1 –	Structure de la chaussée sur le site expérimental de l'autoroute 10.	128
Tableau 6.2 –	Évolution de la fissuration en pistes de roue (mm/m^2) sur le site de l'autoroute 10.	129
Tableau 6.3 –	Description volumétrique des enrobés MB-16.	130
Tableau 6.4 –	Pénétration et classes PG des bitumes employés pour la formulation des enrobés MB-16.	131
Tableau 6.5 –	Modèles de rigidité E (MPa) en fonction de la température T ($^{\circ}\text{C}$) et de la fréquence f_r (Hz) pour les enrobés MB-16.	134
Tableau 6.6 –	Modèles d'angle de phase φ ($^{\circ}$) en fonction de la température T ($^{\circ}\text{C}$) et de la fréquence f_r (Hz) pour les enrobés MB-16.	141
Tableau 6.7 –	Relations de Whöler à 5°C en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$) pour les enrobés MB-16.	145
Tableau 6.8 –	Relations de Whöler à 15°C en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$) pour les enrobés MB-16.	146
Tableau 6.9 –	Valeurs de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$) estimées à partir des relations de Whöler $N_{1/2}$ des enrobés MB-16.	149
Tableau 6.10 –	Valeurs de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$) estimées à partir des relations de Whöler N_r des enrobés MB-16.	149

Tableau 6.11 – Valeurs de rigidité E (MPa), d'angle de phase φ (°) et de déformation ε_6 (µm/m) mesurées à 5 et 15°C et 10 Hz pour les enrobés MB-16.....	151
Tableau 6.12 – Valeurs de $E \cos \varphi$ (MPa) et $E \sin \varphi$ (MPa) mesurées à 5 et 15°C et 10 Hz pour les enrobés MB-16.	152
Tableau 6.13 – Modèles de fatigue $N_{1/2}$ en fonction de la déformation ε (µm/m) et de la rigidité E (MPa) pour les enrobés MB-16.....	153
Tableau 6.14 – Modèles de fatigue N_r en fonction de la déformation ε (µm/m) et de la rigidité E (MPa) pour les enrobés MB-16.....	153
Tableau 6.15 – Modèles de fatigue $N_{1/2}$ en fonction de la déformation ε (µm/m), de la rigidité E (MPa) et de l'angle de phase φ (°) pour les enrobés MB-16.....	154
Tableau 6.16 – Modèles de fatigue N_r en fonction de la déformation ε (µm/m), de la rigidité E (MPa) et de l'angle de phase φ (°) pour les enrobés MB-16.	154
Tableau 6.17 – Modèles de fatigue $N_{1/2}$ généraux en fonction de la déformation ε (µm/m), de la rigidité E (MPa) et de l'angle de phase φ (°) pour les enrobés MB-16.....	155
Tableau 6.18 – Modèles de fatigue N_r généraux en fonction de la déformation ε (µm/m), de la rigidité E (MPa) et de l'angle de phase φ (°) pour les enrobés MB-16.....	155
Tableau 6.19 – Valeurs de rigidité E (MPa) et d'angle de phase φ (°) mesurées à 5 et 15°C et 10 Hz pour les enrobés MB-16.....	157
Tableau 6.20 – Modèles de rigidité E (MPa) en fonction de la température T (°C) et de la fréquence f_r (Hz) pour les enrobés MB-16.	157
Tableau 6.21 – Modèles de fatigue généraux en fonction de la déformation ε (µm/m), de la rigidité E (MPa) et de l'angle de phase φ (°) pour les enrobés MB-16.	158
Tableau 7.1 – Valeurs de rigidité E (MPa) et d'angle de phase φ (°) en tension pour les enrobés GB-20 et MB-16 ainsi que les valeurs de rigidité E_b (kPa) et d'angle de phase φ_b (°) en cisaillement pour les bitumes correspondants.	164
Tableau 7.2 – Modèles de rigidité E (MPa) généraux et globaux en fonction de la température T (°C), de la fréquence f_r (Hz) et de la rigidité E_b (kPa) et de l'angle de phase φ_b en cisaillement des bitumes pour les enrobés GB-20 et MB-16.	165
Tableau 7.3 – Modèles d'angle de phase φ (°) généraux et globaux en fonction de la température T (°C), de la fréquence f_r (Hz) et de la rigidité E_b (kPa) et de l'angle de phase φ_b en cisaillement des bitumes pour les enrobés GB-20 et MB-16.	165
Tableau 7.4 – Modèles de fatigue généraux et globaux en fonction de la déformation ε (µm/m), de la température T (°C), de la rigidité E (MPa) et de l'angle de phase φ (°) pour les enrobés GB-20 et MB-16.	166
Tableau 7.5 – Modèle de rigidité E (MPa) développés dans le cadre de cette étude en fonction de la température T (°C), de la fréquence f_r (Hz) et de la rigidité E_b (kPa) et de l'angle de phase φ_b en cisaillement des bitumes pour les enrobés GB-20 et MB-16.....	172

Tableau 7.6 –	Valeurs de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$) à 5 et 15°C selon le modèle de Shell avec la rigidité dynamique en flexion et la rigidité selon l'approche Shell pour les enrobés MB-16.	177
Tableau 7.7 –	Valeurs de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$) à 5 et 15°C selon le modèle de l'Asphalt Institute avec la rigidité dynamique en flexion et la rigidité selon l'approche Shell pour les enrobés GB-20 et MB-16.	181
Tableau 7.8 –	Valeurs de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$) à 5 et 15°C selon le modèle de Myre avec la rigidité dynamique en flexion pour les enrobés GB-20 et MB-16.....	184
Tableau 7.9 –	Valeurs de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$) à 5 et 15°C selon le modèle de SHRP avec la rigidité dynamique en flexion pour les enrobés GB-20 et MB-16.....	186
Tableau 7.10 –	Modèles de fatigue généraux et globaux en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$), de la température T (°C), de la rigidité E (MPa) et de l'angle de phase ϕ (°) pour les enrobés GB-20 et MB-16.	187
Tableau 7.11 –	Relations de Whöler à 15°C en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$) pour les enrobés GB-20 et MB-16.	196

1. INTRODUCTION

Le ministère des Transports du Québec (MTQ) a acquis en 1995 un appareil pour effectuer des essais de flexion dynamique sur des poutres de matériaux liés. Cet essai permet la caractérisation de la rigidité et de la résistance à la fatigue des enrobés. Le MTQ a élaboré en 1996 un programme de recherche ayant pour objectif d'établir les procédures d'essais pour la caractérisation de ces paramètres. Ce projet a été entrepris en 1997 par l'Université de Sherbrooke et chapeauté par le Service des matériaux d'infrastructures et le Service des chaussées du MTQ.

La rigidité et la résistance à la fatigue d'un enrobé sont des paramètres essentiels pour effectuer la conception des chaussées avec une approche méthodique (mécanistique). La rigidité d'un enrobé permet de déterminer l'épaisseur de revêtement requise pour supporter les charges appliquées par le trafic. La résistance à la fatigue d'un enrobé permet d'estimer la durée de vie de la chaussée sollicitée par le passage répété des véhicules. La caractérisation de la rigidité et de la résistance à la fatigue des enrobés en laboratoire constitue une première au Québec. Le MTQ était limité jusqu'à présent à employer les valeurs et les modèles présentés dans la littérature sur le sujet pour effectuer la conception.

Bien que ce projet constitue une première au Québec, il s'agit d'un sujet largement étudié ailleurs dans le monde depuis plusieurs années. Le chapitre 2 propose une revue des connaissances que l'on retrouve dans la littérature. Le chapitre 3 expose les étapes proposées pour le cheminement du projet ainsi qu'une définition alternative à la norme pour la caractérisation de la rigidité initiale et de la rupture de l'enrobé lors d'un essai de fatigue. Finalement, avant de débiter la caractérisation des enrobés, une étude est proposée au chapitre 4 pour établir la méthode de fabrication des poutres d'enrobé nécessaires à l'essai. Les poutres sont fabriquées à l'aide du compacteur de plaque de type LCPC disponible au Laboratoire des Chaussées du MTQ.

L'objectif principal de ce projet est d'établir une procédure pour la caractérisation de la rigidité et de la résistance à la fatigue des enrobés. À l'intérieur de cette démarche, il est prévu de caractériser différentes familles d'enrobés. Ainsi, des enrobés de base de type ESG-14 et GB-20 sont caractérisés en fonction de la température au chapitre 5 et des enrobés de type MB-16 associés au site expérimental de suivi de performance de l'autoroute 10 sont caractérisés en fonction du type de bitume au chapitre 6. Ces deux études visent principalement le développement des méthodes d'essais et d'analyse mais également l'évaluation du potentiel de l'essai de fatigue pour le classement des enrobés en fonction de leur résistance à la fatigue. Finalement, la quantité de résultats disponibles rend pertinent le développement de modèles généraux pour la conception des chaussées. Ces modèles sont comparés aux modèles proposés dans la littérature au chapitre 7.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

Bien que la caractérisation de la rigidité et de la résistance à la fatigue des enrobés en laboratoire constitue une première au Québec, ce sujet est étudié depuis de nombreuses années par plusieurs agences de transport à travers le monde. Ainsi, la démarche proposée dans le cadre de ce projet doit s'appuyer sur les connaissances acquises ailleurs de manière à développer une expertise comparable sur une période de temps beaucoup plus courte. Pour bien entreprendre cette étude, il est donc primordial et inévitable de consulter la quantité considérable d'informations disponibles sur le sujet. Ce chapitre présente une revue succincte mais la plus complète possible des connaissances puisées dans la littérature jugée pertinente.

Les sujets abordés par cette revue de littérature sont la description du comportement d'un enrobé, la théorie associée aux concepts de la rigidité et de la résistance à la fatigue, l'influence de l'environnement et des paramètres de formulation sur ces concepts, les méthodes d'essais envisageables pour leur caractérisation et l'approche retenue. Des modèles pour déterminer la rigidité et la résistance à la fatigue des enrobés sont présentés à la fin du chapitre. Cette revue de littérature cherche à présenter les contrastes qui existent dans la littérature, principalement en ce qui concerne la résistance à la fatigue des enrobés. La plupart des sujets abordés ici seront repris lors de l'analyse afin d'établir quelle position prendre face à ces différents constats en fonction des résultats obtenus.

2.1 Enrobés

Le revêtement d'une chaussée souple est habituellement fabriqué en mélange bitumineux, communément appelé "enrobé" au ministère des Transports du Québec. Un enrobé est un matériau composite constitué de granulats et de bitume dont les proportions massiques sont généralement d'environ 95 % de granulats et de 5% de bitume. Les granulats constituent le squelette du matériau alors que le bitume en assure sa cohésion. Ce matériau présente des particularités importantes qui influencent l'analyse proposée par la suite. Cette section traite principalement du comportement viscoélastique et non-linéaire de l'enrobé.

2.1.1 Viscoélasticité

De manière simplifiée, on considère qu'un granulat a une réaction instantanée suite à un chargement, ce qui est caractéristique d'un comportement élastique défini par la loi de Hooke. L'équation 2.1 présente cette loi où la relation entre la contrainte σ et la déformation ε est définie par le module élastique de Young E . D'autre part, le bitume a une réaction qui est influencée par le temps de chargement et la température. Son comportement peut être élastique et/ou visqueux dépendant des conditions de sollicitation ce qui fait du bitume un matériau viscoélastique. Un comportement visqueux se caractérise par la loi de Newton présentée par l'équation 2.2 où la relation entre la contrainte σ et le taux de déformation $d\varepsilon/dt$ est définie par le coefficient de viscosité η .

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2.1)$$

$$\sigma = \eta (d\varepsilon/dt) \quad (2.2)$$

La combinaison du granulat et du bitume forme une matrice viscoélastique. Afin d'illustrer la distinction entre un comportement élastique et un comportement visqueux, la figure 2.1 illustre l'influence du temps de chargement sur la réaction de ces deux types de matériaux. On observe que sous l'application d'une même contrainte, la déformation est instantanée pour le matériau élastique alors que la déformation évolue graduellement dans le temps pour le matériau visqueux. Lors du relâchement de la contrainte, le matériau élastique revient instantanément à son niveau de déformation initial alors que le matériau visqueux conserve son nouvel état de déformation.

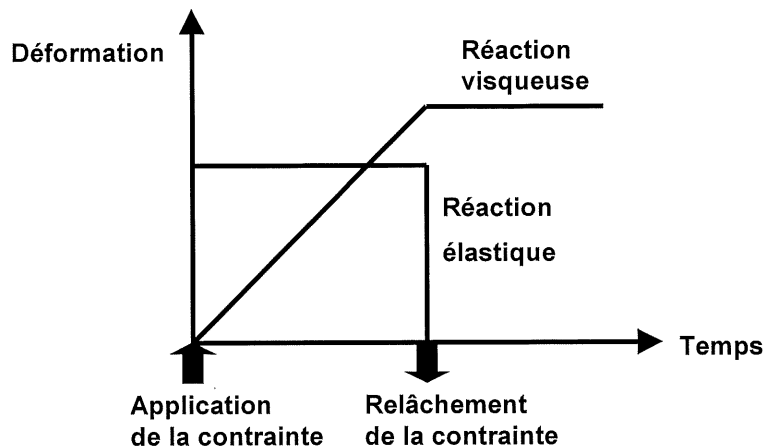


Figure 2.1 – Réaction élastique et visqueuse sous l’application d’une même contrainte.

La figure 2.2 illustre la réaction d’un matériau viscoélastoplastique sous l’application de la contrainte appliquée à la figure 2.1. On observe que la déformation élastique ε_e et plastique ε_p sont instantanées alors que les déformations visqueuses ε_{ve} et ε_{vp} sont influencées par le temps de chargement, que ce soit lors de l’application de la contrainte ou de son relâchement. Lors du relâchement de la contrainte la déformation élastique ε_e revient instantanément à son état initial alors que la déformation viscoélastique ε_{ve} est influencée par le temps de relâchement. Les déformations plastiques ε_p et ε_{vp} sont permanentes.

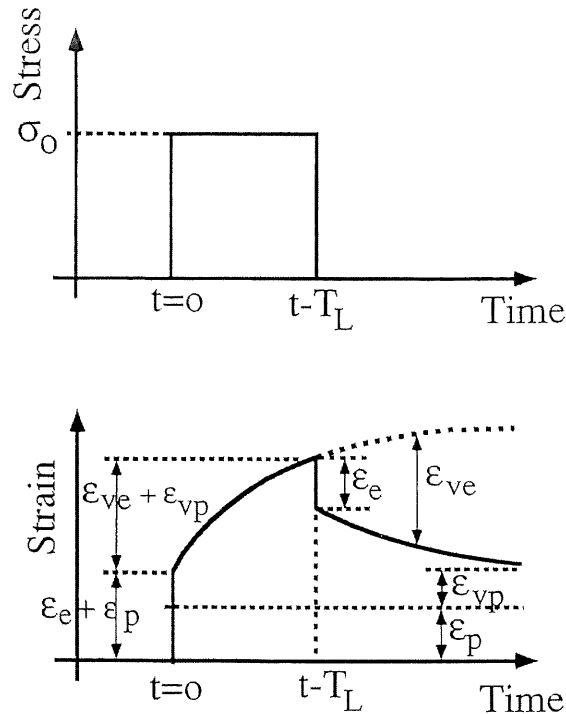


Figure 2.2 – Réaction viscoélastique sous l'application d'une contrainte [Von Quintus 1994].

Ainsi, le comportement d'un enrobé est influencé par la durée de la sollicitation appliquée. De même, la température a une grande influence sur le comportement des matériaux viscoélastiques, principalement au niveau de la valeur du coefficient de viscosité η .

2.1.2 Linéarité

Lorsque le comportement d'un matériau est linéaire, la relation entre la contrainte et la déformation est constante et se représente par une droite dont la pente est le module de Young, tel qu'illustré à la figure 2.3. Par ailleurs, l'enrobé présente un comportement non-linéaire lorsque le niveau de sollicitation dépasse une certaine limite, ce qui complique l'analyse. Dans ce cas, la relation entre la déformation et la contrainte ne peut plus s'exprimer par une constante. La figure 2.3 illustre un comportement non-linéaire où l'on observe que le niveau de contrainte ou de déformation appliqué influence le rapport entre ces deux valeurs. Ce rapport ne représente plus la pente d'une droite, le module linéaire de l'enrobé, mais la relation entre un point sur la

courbe et l'origine, le module sécant. Lorsque l'on observe de l'endommagement de l'enrobé, la relation entre la contrainte et la déformation n'est plus linéaire, ce qui modifie l'analyse que l'on fait de la rigidité. Par ailleurs, on considère généralement que le niveau de sollicitation sur une route est suffisamment faible pour estimer son comportement dans le domaine linéaire, ce qui simplifie l'analyse.

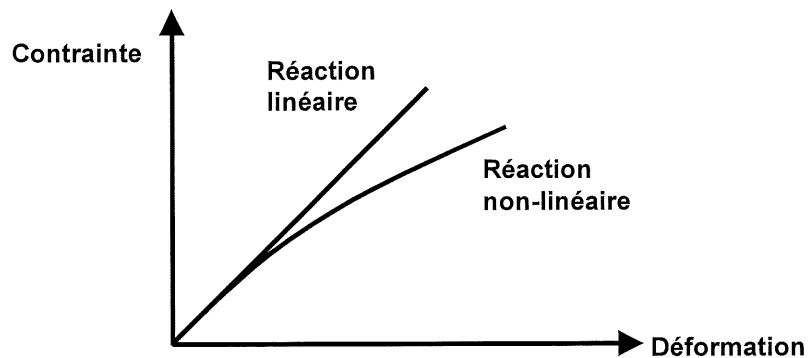


Figure 2.3 - Relation contrainte-déformation linéaire et non-linéaire.

2.2 Rigidité des enrobés

Le terme rigidité a été introduit par Van de Poel en 1954 afin de distinguer ce paramètre du module élastique de Young. Contrairement au module élastique, la rigidité est fonction de la température et du temps de chargement, comme l'indique la figure 2.4 pour un enrobé soumis à différentes conditions de température et de trafic. L'enrobé a une rigidité élevée lorsque sa température est basse et que le temps de chargement est court. Dans ce cas, la rigidité de l'enrobé dépend principalement de la rigidité du bitume et des proportions volumétriques de l'enrobé. À l'opposé, l'enrobé a une rigidité faible lorsque sa température est élevée et que le temps de chargement est long. À ce moment, la rigidité de l'enrobé est principalement influencée par le squelette granulaire [Brown 1995].

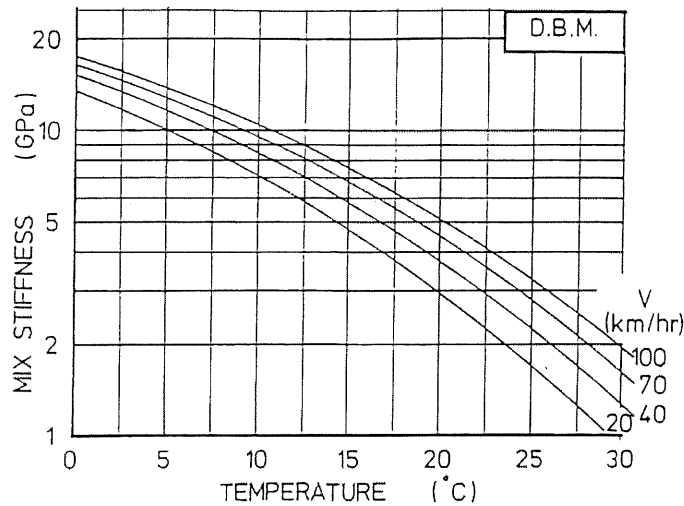


Figure 2.4 - Influence de la température et du temps de chargement sur la rigidité [Brown 1995].

Goodrich suggère de classer le comportement d'un enrobé en trois catégories de température afin de mieux comprendre sa rhéologie [Goodrich 1991]. Le tableau 2.1 décrit les trois catégories proposées par Goodrich, en indiquant laquelle des deux composantes de l'enrobé, le bitume ou le granulat, influence principalement le comportement de l'enrobé.

Tableau 2.1 - Composantes qui influencent principalement le comportement de l'enrobé [inspiré de Goodrich 1991].

Température	Composante principale
Moins de 10°C	Bitume
10°C à 50°C	Bitume & Granulat
Plus de 50°C	Granulat

2.3 Dégradation par fatigue des enrobés

La résistance à la fatigue d'un matériau est sa capacité à supporter des sollicitations répétées sans se fracturer. Une chaussée souple est une structure qui présente un matériau relativement rigide (enrobé) appuyé sur un support déformant (fondation). Chaque passage de véhicule sollicite l'enrobé en flexion, ce qui cause avec le temps la fissuration par fatigue de l'enrobé. Il

s'agit donc d'un processus cumulatif d'endommagement des chaussées. On identifie deux zones de contrainte critiques dans l'enrobé lors du passage d'un véhicule. On retrouve une zone de cisaillement et de tension sous chaque flanc du pneu et une zone de tension en flexion sous le pneu. Cette dernière est maximale à la base de l'enrobé, comme l'illustre la figure 2.5. Les zones critiques en surface entraînent la fissuration de surface, alors que la zone à la base de l'enrobé est responsable de la fissuration par fatigue [Nunn 1997].

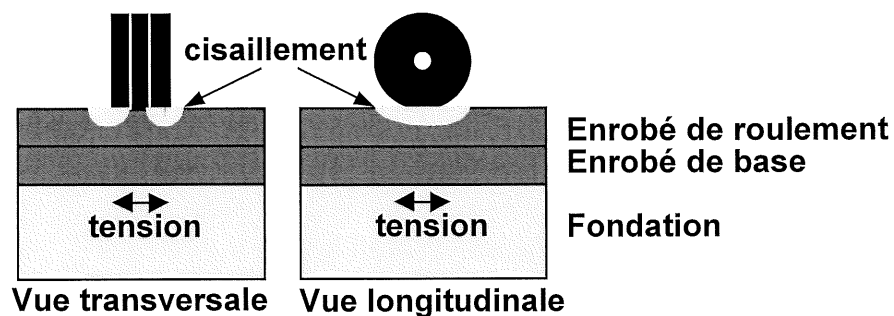


Figure 2.5 - Zones de sollicitation dans un enrobé lors du passage d'un véhicule.

La fissuration de surface est habituellement observée pour de grandes épaisseurs d'enrobé. Little & al considèrent que la fissuration de surface est plus généralisée en ce qui concerne les enrobés d'une épaisseur supérieure à 200 mm [Little & al 1997]. Molenaar a démontré, basé sur une étude théorique, que la fissuration de surface peut être observée pour des chaussées ayant un indice de courbure en surface SCI « Surface Curvature Index », mesuré au déflectomètre à masse tombante FWD « Falling Weight Deflector », inférieur à 120 μm [Molenaar 1995]. Schmorack & Van Dommelen ont examiné, sur des sections de chaussées parrainées par le programme SHRP en Hollande, des fissures qui semblaient être causées par fatigue. L'étude a révélé que pour des enrobés d'une épaisseur supérieure à 160 mm, la fissuration a été initiée à partir de la surface et a pénétré d'environ 100 mm. En ce qui concerne les enrobés plus minces, la fissuration a traversé la pleine épaisseur de l'enrobé et semble s'être propagée du haut vers le bas. Les conclusions de cette étude indiquent que, contrairement au modèle conventionnel, la fissuration par fatigue n'est pas le mécanisme de dégradation prédominant, il s'agit plutôt de la fissuration de surface [Schmorak & Van Dommelen 1995]. Nunn a vérifié l'influence de la fissuration de surface sur la

capacité structurale des chaussées en Angleterre. Il a démontré que les sections présentant de la fissuration de surface ne sont pas structurellement plus faibles que les sections non-fissurées [Nunn 1997].

La fissuration par fatigue est un mécanisme de dégradation qui affecte plus particulièrement les enrobés d'épaisseurs moyennes classés entre 50 et 200 mm par Little & al [Little & al 1997]. Il existe toutefois des études, telle celle de Prozzi & De Beer, qui ont identifié de la fissuration causée par fatigue sur des revêtements d'épaisseur inférieure à 50 mm [Prozzi & De Beer 1997]. Le guide de conception français considère que la dégradation par fatigue est négligeable pour un enrobé d'une épaisseur inférieure à 30 mm. Ces enrobés sont surtout sollicités en compression et en cisaillement [LPC & Setra 1994].

La déformation en tension à la base du revêtement est le paramètre généralement retenu pour décrire le niveau de sollicitation en fatigue appliqué par un véhicule. Cette déformation peut se mesurer dans deux directions, soit transversalement et longitudinalement, comme le montre la figure 2.6. Huhtala & al ont identifié que la déformation transversale est strictement en tension, alors que la déformation longitudinale est précédée et suivie de déformations en compression, comme le montre les graphiques de la figure 2.6 [Huhtala & al 1990]. La valeur de la déformation en compression initiale à la base de l'enrobé représente environ le septième de la déformation en tension [Raithby & Sterling 1972]. La déformation transversale est habituellement supérieure à la déformation longitudinale et, dû à la prédominance des efforts transversaux, la fissuration observée est généralement longitudinale dans les traces de roues [Huhtala & al 1990]. Par la suite, les fissures se propagent sous forme de carrelage « alligator cracking » par l'effet des efforts longitudinaux.

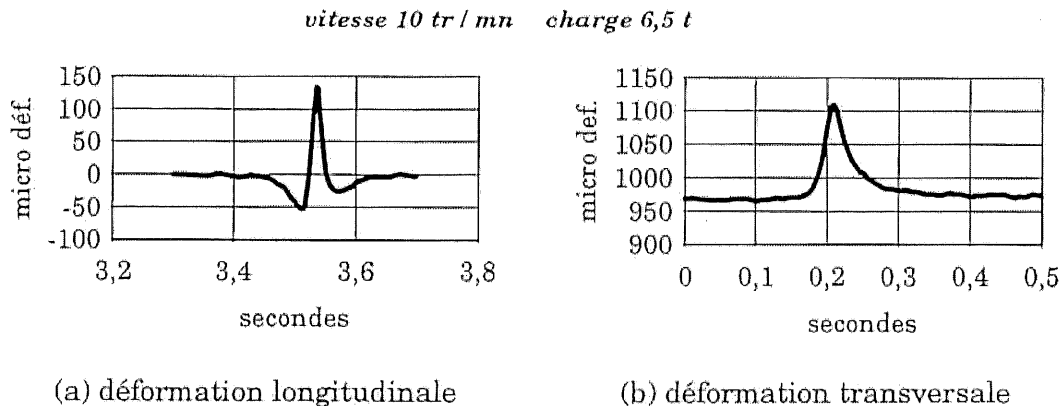


Figure 2.6 - Sollicitation longitudinale (a) et transversale (b) de l'enrobé [De La Roche 1996b].

2.4 Influence de l'environnement

Le comportement d'un enrobé est influencé par le temps de chargement et la température. Ces deux paramètres se retrouvent sur la route par l'effet combiné du trafic et des conditions climatiques. On doit donc connaître la variation et l'intensité de ces deux facteurs si l'on désire évaluer la réaction de l'enrobé au passage d'un véhicule.

2.4.1 Trafic

Une des fonctions de l'enrobé dans la structure de la chaussée est de distribuer les charges appliquées par le trafic aux couches sous-jacentes. Les contraintes et les déformations engendrées à l'intérieure des différentes couches de la chaussée doivent être inférieures aux valeurs admissibles par les matériaux. La caractérisation de la rigidité de l'enrobé permet de déterminer le niveau de contrainte et de déformation qui est appliqué à l'interface entre l'enrobé et la fondation lors du passage d'un véhicule. Une grande rigidité permet de limiter les sollicitations distribuées aux fondations par l'enrobé, comme l'indique la figure 2.7 [Brown 1995].

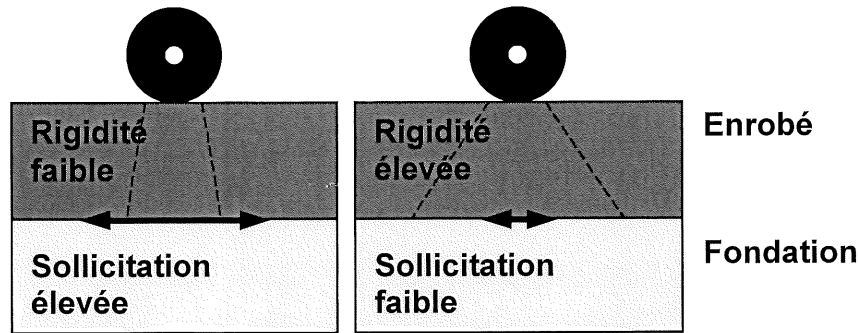


Figure 2.7 - Distribution de la charge dans un enrobé en fonction de sa rigidité.

Chaque sollicitation en flexion appliquée par le trafic résulte en une déformation en tension à la base de l'enrobé que l'on peut calculer si l'on connaît les caractéristiques du trafic et des composantes de la chaussée [Doan 1977]. Chaque déformation en tension appliquée équivaut à un dommage en fatigue qui se cumule à chaque passage de véhicule jusqu'à ce que la rupture de l'enrobé soit atteinte. La loi de Miner (1945) présentée par l'équation 2.3 est fréquemment employée pour caractériser l'accumulation des dommages. Cette loi présente le rapport entre le nombre de passage d'essieu normalisé cumulé N_i et le nombre de passage admissible N_{adm} déterminé selon un modèle de fatigue. Lorsque le rapport est égal à l'unité la rupture est atteinte.

$$\sum N_i / N_{adm} = 1 \quad (2.3)$$

2.4.2 Climat

Les propriétés des matériaux d'une chaussée varient en fonction des conditions climatiques. Cette variation est encore plus marquée pour les régions exposées au gel et à des précipitations abondantes comme le Québec. Les valeurs de déformation en tension à la base de l'enrobé varient au cours de l'année en fonction des conditions climatiques, ce qui rend difficile la prédiction des dommages par fatigue. Pour simplifier l'analyse, plusieurs auteurs suggèrent d'employer une seule température, soit la température effective ou la température critique [Tayebali & al 1994, LPC & Setra 1994]. La température effective est la température moyenne en terme de dommages sur une année. La température critique est la température où il se produit

le plus de dommages au cours de l'année dû à sa fréquence d'occurrence et à la sensibilité de la chaussée à cette température.

Les résultats d'une étude parrainée par le programme SHRP proposent une température de 20°C comme température critique pour l'ensemble du territoire continental américain [Tayebali & al 1994]. Cette conclusion est basée sur une analyse des dommages effectuée avec l'hypothèse que les caractéristiques des couches sous-jacentes à l'enrobé ne varient pas au cours de l'année. De son côté, Myre affirme qu'en Norvège, la fissuration par fatigue est un mécanisme de dégradation spécialement important lors de la période du dégel printanier, alors que les fondations sont affaiblies par une grande teneur en eau. Il indique que la température de l'enrobé est d'environ 5°C au cours de cette période [Myre 1992]. Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France ainsi que l'Angleterre emploient une température de 15°C comme température effective [Brown 1978, LPC & Setra 1994].

Le constat de Myre est confirmé au Québec par Doré & Savard. Ils ont observé que la fissuration par fatigue évolue 1.6 fois plus rapidement au printemps qu'en hiver et 15 fois plus rapidement qu'en été. Par ailleurs, compte tenu de la plus grande durée de la saison hivernale, 49% des dommages par fatigue ont eu lieu lors de cette période comparativement à 42 % lors du printemps et 9% en été et à l'automne. Une étude plus poussée de la fissuration au cours de la période hivernale a indiqué que la majorité des dommages sont associés au dégel partiel des fondations. Ainsi, les auteurs concluent que la fissuration par fatigue est un phénomène principalement associé au dégel partiel et printanier dans un contexte de climat nordique [Doré & Savard 1998].

2.5 Méthodes d'essais

La caractérisation de la rigidité et de la résistance à la fatigue constitue deux études distinctes qui sont réunies dans le cadre de ce projet puisque l'on suggère d'employer le même appareillage pour les caractériser. Il existe une grande quantité de méthodes d'essais disponibles

pour la caractérisation de la rigidité et de la résistance à la fatigue des enrobés. Chaque essai donne un résultat différent associé à sa configuration. Il est difficile, voir même impossible, de relier les résultats de différentes méthodes d'essais entre eux. Cette section présente les différentes méthodes d'essais disponibles. Il est également question de la préparation des échantillons nécessaires pour effectuer les essais.

2.5.1 Rigidité

Généralement, on divise les essais pour caractériser la rigidité d'un enrobé en deux catégories, soit réversible ou dynamique. Les essais réversibles appliquent un chargement et laissent ensuite un temps de repos, alors que les essais dynamiques appliquent un chargement cyclique continu. La rigidité obtenue à l'aide des deux méthodes diffère car la mesure de la déformation est différente. Lors d'un essai dynamique, les déformations permanentes ne sont généralement pas admises puisque l'échantillon est habituellement ramené à sa position initiale à la fin de chaque cycle. Dans le cas de l'essai réversible, on ne mesure que la déformation obtenue lors du retour élastique. Ainsi, la déformation mesurée lors d'un essai dynamique est plus grande que celle mesurée lors de l'essai réversible, ce qui signifie que la rigidité dynamique est plus faible que la rigidité réversible [Said 1995].

Bien que l'enrobé présente des déformations permanentes qui sont plastiques et/ou visqueuses, l'analyse mécanique des chaussées se fait à partir de modèles élastiques. La rigidité mesurée par un essai dynamique n'est donc pas adaptée à une étude élastique puisque sa valeur inclut les déformations permanentes. De plus, il semble que les essais dynamiques se comparent à la sollicitation dans le sens longitudinal au trafic où la déformation est habituellement nulle suite au passage du véhicule. Les essais réversibles se comparent à la sollicitation transversale, sollicitation plus intense que la sollicitation longitudinale, où l'effort est strictement en tension et diminue lentement vers zéro suite au passage du véhicule [Huhtala & al 1990]. Pour ces raisons, Said suggère l'emploi d'essais réversibles pour la caractérisation de la rigidité de l'enrobé [Said 1995].

Cependant, plusieurs agences emploient des essais dynamiques pour caractériser la rigidité de leur enrobés. Par exemple, le LCPC emploie les résultats d'un essai cyclique de flexion de poutre pour la conception de leurs chaussées. La sollicitation appliquée est faible et le nombre de cycles appliqué est restreint afin de ne pas endommager l'enrobé et ainsi mesurer sa rigidité linéaire, tel que discuté à la section 2.1.2.

Le programme de recherche américain SHRP a comparé les résultats obtenus à l'aide de deux essais réversibles et de deux essais dynamiques présentés au tableau 2.2 [Tayebali & al 1994^b]. Les quatre essais semblent sensibles aux différents paramètres. Seul l'essai de sollicitation diamétrale, souvent appelé l'essai de tension indirecte, est considéré moins fiable que les autres par son incapacité à mesurer adéquatement le coefficient de Poisson, paramètre nécessaire à la détermination de la rigidité réversible. On assume généralement une valeur de coefficient de Poisson de 0.35. De plus, il est recommandé de ne pas excéder 20°C lors de caractérisations avec l'essai diamétral alors que les autres types d'essais peuvent facilement excéder cette température. [Tayebali & al 1994^b, Van Dijk & Visser 1977, Brown 1978]

Tableau 2.2 - Méthodes d'essai pour caractériser la rigidité d'un enrobé.

Catégories	Méthodes d'essai
Rigidité réversible	Sollicitation axiale Sollicitation diamétrale
Rigidité dynamique	Sollicitation en flexion Sollicitation en cisaillement

2.5.2 Résistance à la fatigue

En ce qui concerne la dégradation par fatigue, les enrobés subissent des contraintes et des déformations complexes et aléatoires qu'il est impossible de reconstituer en laboratoire. Si on admet que la fissuration par fatigue est causée par la déformation répétée en tension à la base de la couche d'enrobé, un essai uniaxial peut permettre de prévoir la résistance à la fatigue d'un enrobé [Doan 1977]. Deacon & al ont identifié cinq procédures d'essai parmi les plus employées qui permettent de caractériser les paramètres fondamentaux nécessaires à l'étude de la fatigue [Deacon & al 1995]. Les essais sont énumérés dans le tableau 2.3 et sont divisés en trois

catégories. Bien entendu, il s'agit d'essais cycliques puisque la dégradation par fatigue est un processus cumulatif de l'endommagement.

Tableau 2.3 - Catégories d'essai pour l'étude de la fatigue.

Catégorie d'essai	Description
Essai de fatigue en flexion	Chargement cyclique d'une poutre aux tiers points Chargement cyclique d'un trapèze à son extrémité
Essai de fatigue en tension	Chargement cyclique d'un cylindre en tension-compression Chargement cyclique d'un cylindre en tension indirecte
Étude mécanistique des fissures	Loi de Paris

L'étude des cinq méthodes d'essai dans le cadre du programme SHRP a dès le départ révélée les lacunes de deux essais. L'essai en tension-compression d'un cylindre s'est avéré très difficile à réaliser dû à la difficulté d'agripper le cylindre pour effectuer le chargement en tension, la rupture se produisant constamment aux extrémités du cylindre. D'autre part, l'étude mécanistique des fissures s'est révélée trop fastidieuse pour permettre l'analyse de routine des enrobés. Un grand nombre d'essais est nécessaire pour évaluer la vitesse de propagation da/dN ainsi que le facteur d'intensité de contrainte K caractérisant la loi de propagation des fissures de Paris présentée par l'équation 2.4.

$$da/dN = C \Delta K^n \quad (2.4)$$

L'essai de tension indirecte est particulièrement intéressant puisqu'il emploie des échantillons sous forme de brique ce qui en fait une méthode simple et peu coûteuse. La figure 2.8 montre le mode de chargement en compression aux extrémités de la brique qui transfère un effort de tension au centre selon un plan perpendiculaire au plan de compression ce qui donne à cette méthode le nom d'essai de tension indirecte. Cet essai a été rejeté par l'étude du programme SHRP dû à l'occurrence de patrons de fissuration inacceptables et à la concentration de la contrainte appliquée aux points de chargement. De plus, l'essai est limité uniquement au mode de sollicitation à contrainte contrôlée et le rapport entre l'effort de tension et de compression au centre de la brique est fixe ce qui représente un cas unique de ce qui se produit sur la route. [Deacon & al 1995, Judycki 1991, Rao Tangella & al 1990]. Myre fait remarquer qu'un plus

grand nombre d'essais est nécessaire avec l'essai par sollicitation diamétrale pour obtenir une loi de fatigue ayant une précision équivalente à celle tirée d'un essai de flexion. Par exemple, 10 essais de tension indirecte ont été nécessaires pour obtenir une précision équivalente à 6 essais de flexion aux tiers points [Myre 1992].

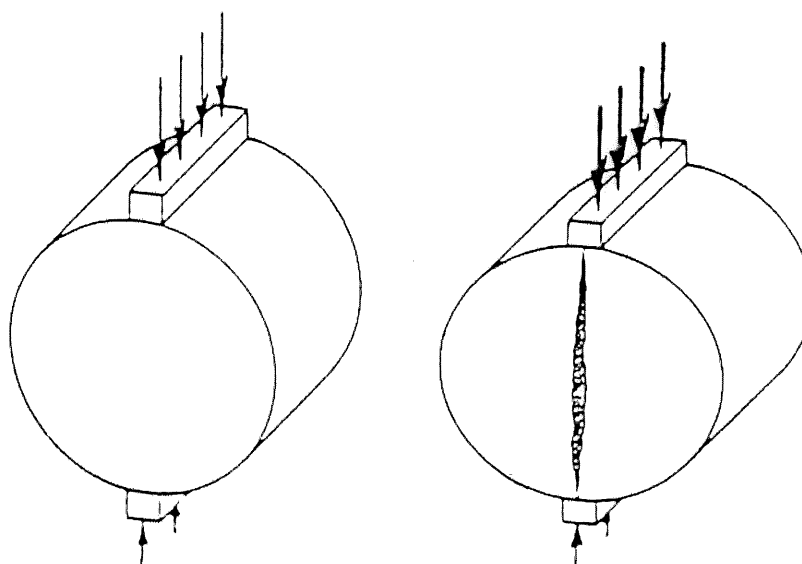


Figure 2.8 – Essai de tension indirecte [Kennedy 1977].

En ce qui concerne les essais de flexion, l'étude du SHRP considère que l'essai de flexion d'une poutre rectangulaire appuyée aux extrémités avec un chargement appliqué aux tiers points de la figure 2.9 ainsi que l'essai de flexion d'une poutre trapézoïdale encastrée à sa base avec un chargement appliqué à son extrémité de la figure 2.10 sont des moyens équivalents pour caractériser le comportement en fatigue des enrobés [Deacon & al 1995]. Par ailleurs, Pronk a montré que pour des essais à déformation contrôlée effectués dans les mêmes conditions, l'essai de flexion trapézoïdal donne un nombre de cycles à la rupture deux fois inférieur à l'essai de flexion de poutre aux tiers points. Il affirme que ce constat s'explique en partie par la différence au niveau de la distribution de la contrainte entre les deux essais tel que l'illustre la figure 2.11 sous la mention « 2 points » pour l'essai trapézoïdal et « 4 points » pour l'essai aux tiers points. Les dimensions du trapèze ont été sélectionnées dans le but d'appliquer la contrainte maximale à mi-hauteur de la poutre afin de diminuer l'effet de l'encastrement et de l'extrémité sur

l'évolution de la fissuration. L'essai de flexion de poutre aux tiers points a été conçu de manière à appliquer un moment fléchissant uniforme sur la section centrale de la poutre. Cette différence entre les deux distributions conduit à un processus de fissuration plus rapide dans le cas d'un chargement à l'extrémité de la poutre trapézoïdale [Pronk 1997].

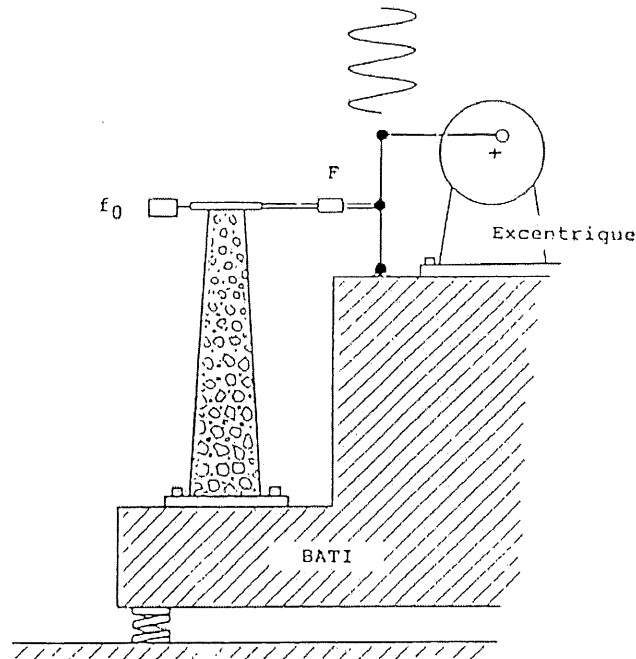


Figure 2.9 – Essai de flexion avec chargement appliqué à l'extrémité d'une poutre trapézoïdale [Moutier 1990].

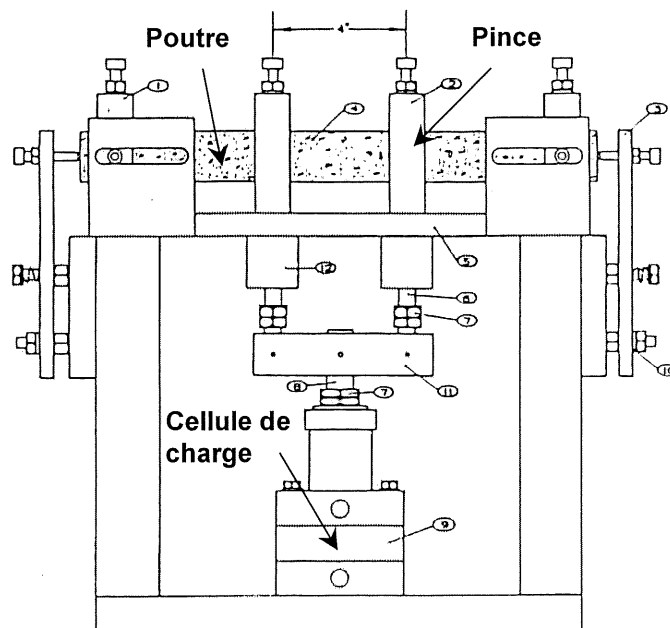


Figure 2.10 – Essai de flexion avec chargement appliqué aux tiers points d’une poutre rectangulaire [Bronstein & Sousa 1995].

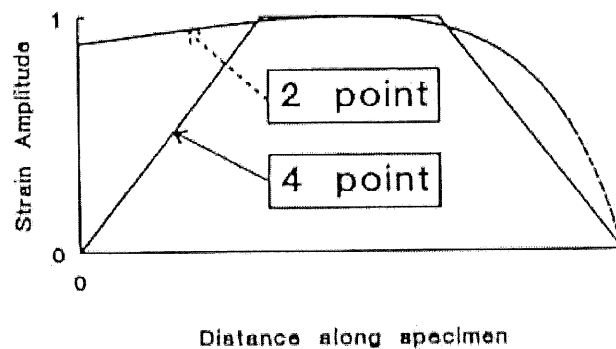


Figure 2.11 - Distribution de la déformation lors d’un essai de flexion de poutre trapézoïdale chargée à son extrémité (2 points) et rectangulaire chargée aux tiers points (4 points) [Pronk 1997].

L’essai de flexion de poutres trapézoïdales est employé entre autres au centre de recherche Shell au Pays-Bas, au centre de recherches routières en Belgique et au laboratoire central des ponts et chaussées en France. L’essai de flexion de poutres aux tiers points est employé par l’université de la Californie au États-Unis, au laboratoire de recherche en routes de Norvège et au département des transports de l’Afrique du Sud.

2.5.3 Préparation des poutres

Dans le cadre du programme de recherche américain SHRP, deux méthodes pour le compactage des poutres destinées à l'essai de fatigue en flexion ont également été évaluées. Il s'agit des méthodes de compactage par pétrissage « kneading compaction » et par rouleau « rolling wheel compaction » [Tayebali & al 1994]. Une différence de 33% a été observée entre les coefficients de variation associés à des résultats d'essai de fatigue obtenus avec des poutres compactées selon ces deux modes de compactage. Cette différence est attribuable à la fracturation des granulats lors du compactage par pétrissage [Tayebali & al 1996]. La méthode par rouleau emploie un rouleau d'acier en mode statique, habituellement utilisé pour le compactage des trottoirs, pour le compactage de l'enrobé dans un moule. Cette méthode ne fracture pas les granulats lors du compactage [Tayebali & al 1994] et donne des poutres avec une structure de granulats et de vides homogènes [Harvey & Monismith 1993].

2.6 Caractérisation de la rigidité en laboratoire

La rigidité est la relation entre la contrainte et la déformation en fonction du temps et de la température. Les essais de laboratoire sont effectués dans le but de caractériser l'enrobé en ce sens. Cette section présente les différentes formes de modélisation, de caractérisation et de représentation de la rigidité d'un enrobé.

2.6.1 Modélisation

La rigidité ne représente qu'une partie du concept de module pour un matériau viscoélastique. La valeur de module de ce type de matériau se définit par un nombre complexe. L'équation 2.5 présente cette notion de module complexe E^* qui a été introduite afin de généraliser les lois de la mécanique en principe réservées aux matériaux élastiques [Uge & al 1977]. La partie réelle du nombre complexe E' représente le module d'accumulation qui est associée au comportement élastique du matériau et qui permet d'évaluer la partie récupérable de l'énergie emmagasinée. La partie imaginaire du nombre complexe E'' représente le module de perte qui est associé au

comportement visqueux irréversible du matériau et qui rend compte de l'énergie perdue par frottement interne [Rivière 1996, Kim & Lee 1996].

$$E^* = E' + i E'' \quad (2.5)$$

Généralement, on représente le module complexe sous sa forme polaire selon le modèle présenté par l'équation 2.6, ce qui met en évidence deux paramètres rhéologiques fondamentaux pour l'étude des matériaux viscoélastiques: la norme du module complexe $|E^*|$ ainsi que l'angle de phase ϕ . La représentation graphique de ce modèle en fonction de E' et E'' à la figure 2.12 permet de décrire le module complexe E^* par les équations 2.7 à 2.10.

$$E^* = |E^*| e^{i\phi} \quad (2.6)$$

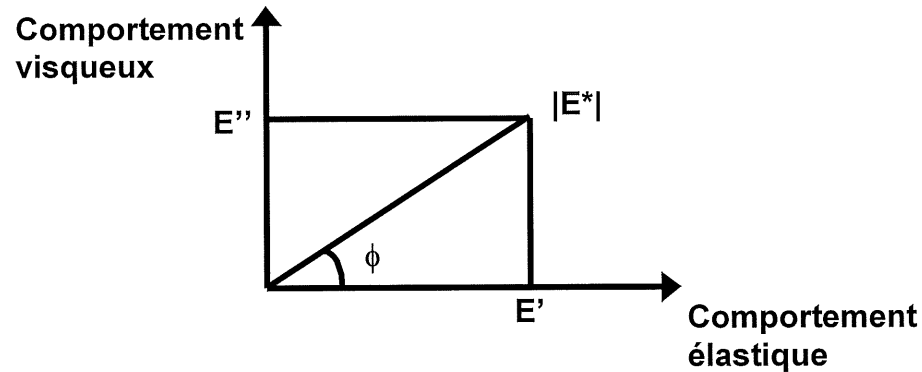


Figure 2.12 - Représentation du module complexe sous sa forme polaire.

$$|E^*| = [(E')^2 + (E'')^2]^{1/2} \quad (2.7)$$

$$\phi = \tan^{-1} (E'' / E') \quad (2.8)$$

$$E' = |E^*| \cos \phi \quad (2.9)$$

$$E'' = |E^*| \sin \phi \quad (2.10)$$

La norme du module complexe $|E^*|$ est communément appelée le module dynamique ou simplement la rigidité. De manière analogue au module de Young, elle est souvent notée E et est déterminée en calculant le rapport entre l'amplitude de la contrainte σ et l'amplitude de la

déformation ε selon l'expression de l'équation 2.11. Par ailleurs, il ne faut pas oublier que sa valeur est influencée par le temps de chargement t et la température T . La rigidité est fréquemment employée pour comparer les enrobés et effectuer les calculs de conception. Par exemple, le LCPC emploie la valeur du module dynamique à 15°C et 10 Hz pour la conception des chaussées.

$$|E^*|(t, T) = \sigma / \varepsilon \quad (2.11)$$

Un matériau viscoélastique présente une particularité importante dans sa réaction à une sollicitation. La déformation engendrée par l'application d'une contrainte est décalée dans le temps. L'angle de phase ϕ représente cette propriété par le rapport du laps de temps séparant l'application de la contrainte et l'apparition de la déformation t_Δ sur le temps nécessaire pour effectuer un cycle de chargement t_{total} . Cette expression est décrite par l'équation 2.12 et la figure 2.13 où le rapport est exprimé en degré d'angle, 360° correspondant à un cycle complet [Huang 1993, Kim & Lee 1996].

$$\phi = 360^\circ (t_\Delta / t_{\text{total}}) \quad (2.12)$$

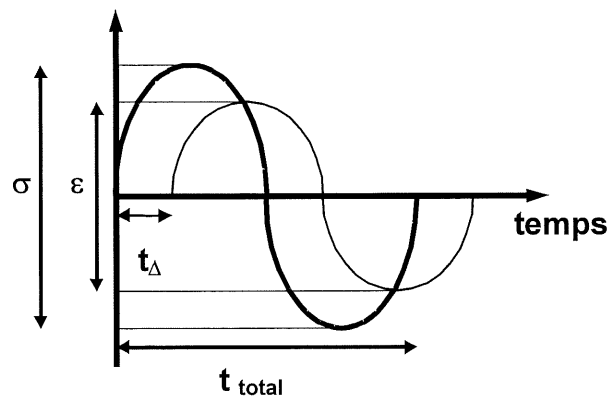


Figure 2.13 - Cycle de sollicitation sinusoïdale sur un matériau viscoélastique.

Pour un matériau purement élastique, l'angle de phase a une valeur nulle et le module est un nombre réel, le module de Young. Pour un matériau purement visqueux, l'angle de phase a une

valeur de 90° . Ainsi, la valeur de l'angle de phase donne une idée de la prédominance élastique ou visqueuse de l'enrobé [Rivière 1996]. Lorsque le temps nécessaire pour effectuer un cycle de contrainte est égal au temps pour effectuer un cycle de déformation, l'enrobé n'est pas endommagé par la sollicitation appliquée [Said 1995].

2.6.2 Caractérisation

Pour caractériser la rigidité et l'angle de phase d'un enrobé, on effectue généralement des essais cycliques avec un faible niveau de sollicitation sur une courte durée afin de ne pas endommager le matériau et ainsi demeurer le plus près possible d'un comportement linéaire. Une approche largement répandue consiste en un balayage de fréquence qui permet de caractériser l'enrobé sur une plage de fréquence pour une température déterminée [Rivière 1996, Soliman 1976, Zhang 1997]. Par la suite, il est possible d'employer à nouveau la poutre pour effectuer la caractérisation à une autre température puisque l'enrobé n'est pas endommagé. Par exemple, le LCPC emploie des fréquences de 1, 3, 10 et 30 Hz ainsi que des températures de -10, 0, 10, 20, 30 et 40°C pour caractériser ses enrobés [LPC & Setra 1994]. Certains auteurs préfèrent employer la rigidité initiale mesurée lors de l'essai de fatigue pour la conception [Harvey & Monismith 1993].

2.6.3 Représentation

Les résultats peuvent être représentés sous forme d'isothermes où les valeurs de rigidité ou d'angle de phase sont exprimées en fonction du logarithme de la fréquence pour chaque température caractérisée. La figure 2.14 montre cette représentation pour des valeurs de rigidité. Il est également possible de présenter les valeurs obtenues par des isochrones lorsque plusieurs températures sont caractérisées. Il suffit de présenter la rigidité et l'angle de phase en fonction de la température pour chaque fréquence.

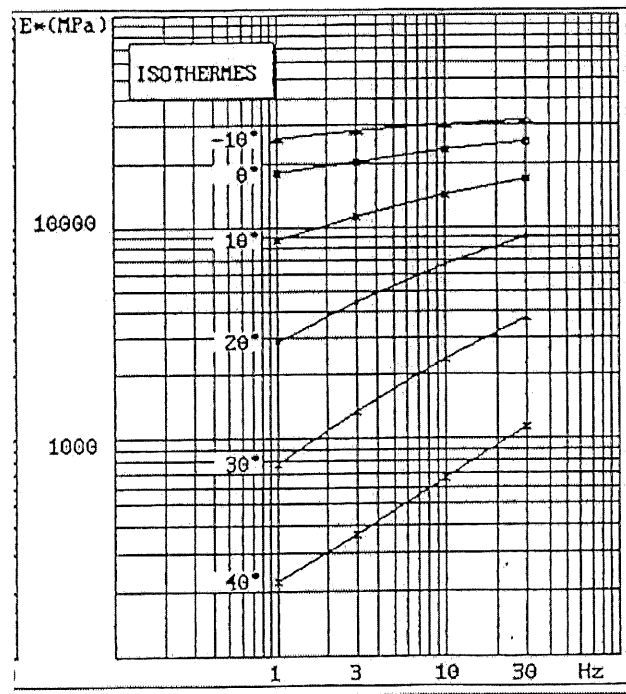


Figure 2.14 - Courbes isothermes de rigidité [Rivière 1996].

Les différentes isothermes obtenues peuvent être déplacées les unes par rapport aux autres par translation pour former une courbe maîtresse. Pour ce faire, on emploie une fonction de transfert X décrite par l'équation 2.13 qui est fonction de la fréquence et de la relation d'Arrhenius décrite par l'équation 2.14 en fonction de l'énergie d'activation ΔH et de la constante universelle des gaz R [Franken & Vanelstraete 1996]. Cette transformation est basée sur le principe d'équivalence temps-température qui n'est valide que dans le domaine linéaire [Rivière 1996]. Le comportement de l'enrobé peut ne pas satisfaire aux conditions de linéarité mais on considère généralement que lorsque l'enrobé n'est pas endommagé son comportement est pratiquement linéaire. La courbe maîtresse permet de décrire le module complexe sur un large éventail de fréquence pour une température de référence, comme l'illustre la figure 2.15. La dépendance viscoélastique de l'enrobé est caractérisée par l'allure non horizontale de la courbe maîtresse, l'horizontalité caractérisant les matériaux purement élastiques qui ne sont pas influencés par le temps de chargement et la température [Soliman 1976].

$$X = \log(a_T) + \log(\text{fréquence}) \quad (2.13)$$

$$\log a_T = 0,4343 \Delta H / R (1/T + 1/T_s)] \quad (2.14)$$

ΔH = énergie d'activation (50 kcal/mol/°K)

R = constante universelle des gaz (1,98 cal/mol/°K)

T = température d'essai (°K)

T_s = température de référence (°K)

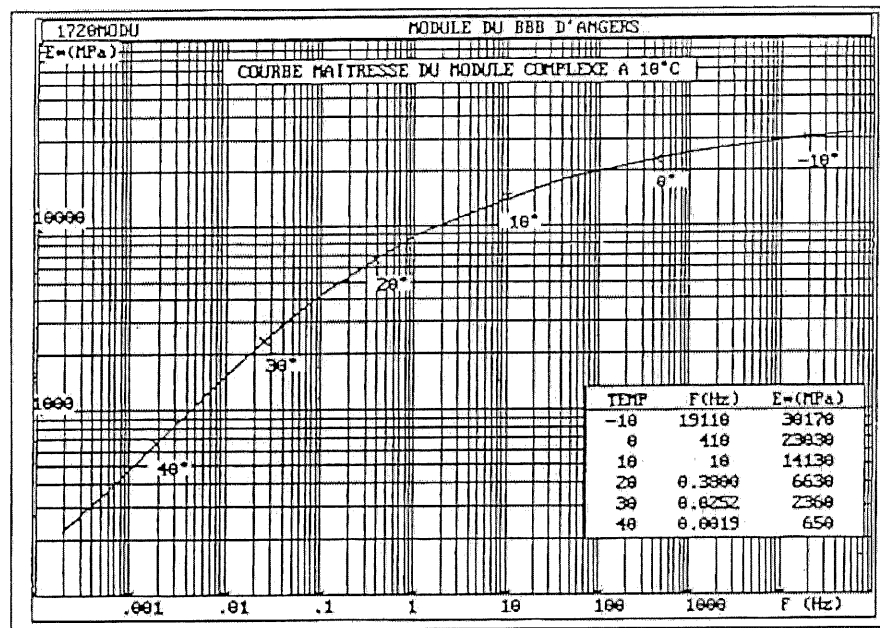


Figure 2.15 - Courbe maîtresse de module complexe [Rivière 1996].

Il est également possible de présenter l'effet combiné des valeurs de rigidité et d'angle de phase dans un plan de Black. La figure 2.16 illustre ce type de représentation où l'on exprime l'angle de phase en fonction du logarithme de la rigidité. La distribution caractéristique des valeurs permet de déterminer le module élastique de l'enrobé, module lorsque la valeur d'angle de phase est nulle. Pour ce faire, il suffit d'extrapoler la distribution des valeurs obtenues jusqu'à l'axe du logarithme de la rigidité. Le module élastique est la valeur de module maximal de l'enrobé.

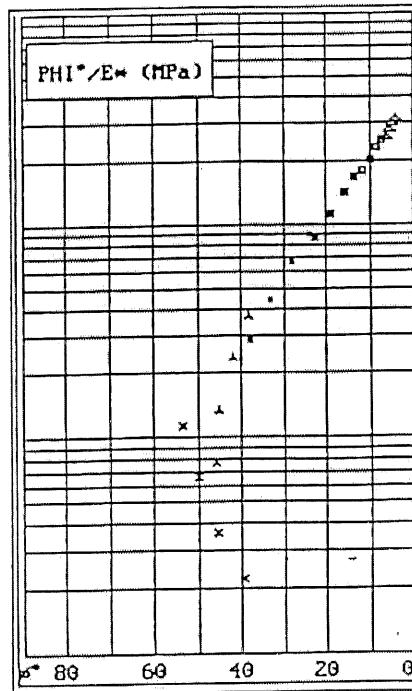


Figure 2.16 - Représentation du module complexe dans un plan de Black [Rivière 1996].

On observe également que la valeur de l'angle de phase diminue lorsque la rigidité devient particulièrement faible. Pourtant, une diminution de la rigidité est généralement associée à une augmentation de la valeur de l'angle de phase. Ce principe est valable pour le bitume mais ne correspond pas à la réalité de l'enrobé. Lorsque la température augmente, ou que la vitesse diminue, l'influence du bitume devient moins importante sur la réaction de l'enrobé et l'influence du squelette granulaire se fait sentir, conformément à la discussion de la section 2.2. Ainsi, le granulat étant un matériau élastique, la valeur d'angle de phase de l'enrobé tend à diminuer avec l'augmentation de l'influence du squelette granulaire.

2.7 Caractérisation de la résistance à la fatigue en laboratoire

La résistance à la fatigue d'un matériau est définie par le nombre de chargement qu'il peut subir avant sa rupture. L'essai est donc cyclique et se termine lorsque la rupture du matériau est atteinte. Cette section présente l'approche préconisée pour la modélisation et la caractérisation de

la résistance à la fatigue de l'enrobé. De plus, on discute de l'influence du mode de sollicitation appliqué, de l'ajout d'une période de repos entre les chargements ainsi que de l'évolution de certains paramètres lors de l'endommagement par fatigue d'un enrobé en laboratoire.

2.7.1 Modélisation

Pour caractériser la résistance à la fatigue d'un enrobé, on effectue quelques essais à différents niveaux de sollicitation sur des échantillons identiques. Pour chaque essai, on compile le nombre de cycles nécessaire à la rupture. Par convention, la rupture par fatigue de l'enrobé est atteinte lorsque la rigidité initiale de la poutre a diminué de moitié. Le programme de recherche SHRP, le LCPC ainsi que différentes agences de recherche emploient la rigidité suite à 50 cycles de chargement comme rigidité initiale de l'enrobé [Rao Tangella & al 1990, Tayebali & al 1994]. Certaines agences emploient 200 cycles comme condition initiale affirmant qu'il s'agit du nombre de cycles nécessaire pour que la réaction de l'échantillon se stabilise. Une étude de Baburamani & Potter a indiqué qu'il n'y avait pas de raison de croire que le comportement du matériau était plus stable à 200 cycles qu'à 50 cycles [Baburamani & Potter 1996].

Il existe différents modes de sollicitation pour effectuer un essai de fatigue. Les deux modes généralement employés sont à contrainte σ ou à déformation ε contrôlée. À contrainte contrôlée, l'amplitude de la contrainte est conservée constante au cours de l'essai. À déformation contrôlée, c'est l'amplitude de la déformation qui est conservée constante au cours de l'essai. Les différents résultats obtenus pour un enrobé permettent de caractériser la relation développée par Whöler en 1870 décrite par l'équation 2.15. Cette équation exprime le nombre de cycles à la rupture N en fonction du niveau de sollicitation appliqué (ε ou σ) par une relation exponentielle où les constantes B et m sont déterminées expérimentalement.

$$N = B (\varepsilon \text{ ou } \sigma)^m \quad (2.15)$$

La courbe de Whöler est une relation linéaire si elle est exprimée en coordonnées logarithmiques, comme le montre la figure 2.17 pour une caractérisation effectuée à deux niveaux de sollicitation avec trois essais par niveau. L'équation 2.16 décrit cette équation qui est en réalité l'équivalent

de l'équation 2.15 avec les pentes m qui sont égales et l'ordonnée à l'origine $b = \log B$ ou $B = 10^b$. Il est important de noter que la représentation classique de la droite de Whöler à la figure 2.17 présente le logarithme de la sollicitation en fonction du nombre de cycles, ce qui est l'inverse de la relation de dépendance entre les variables décrite par les équations 2.15 et 2.16.

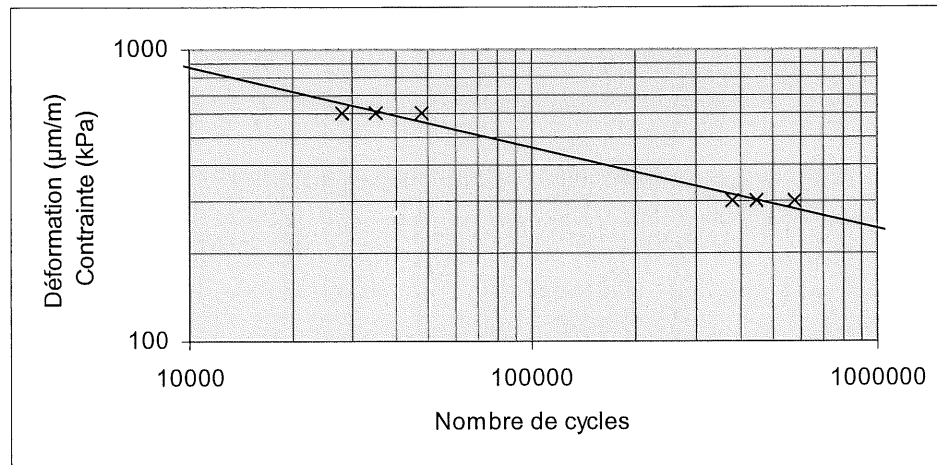


Figure 2.17 - Courbe de Whöler.

$$\log N = m \log (\varepsilon \text{ ou } \sigma) + b \quad (2.16)$$

Si on possède plusieurs équations de ce type pour différents enrobés, il est alors possible de classer ces enrobés. Pour ce faire, on peut envisager d'identifier un point sur la droite pour caractériser sa position. Un point fréquemment employé est le niveau de déformation ε_6 ou de contrainte σ_6 nécessaire pour que la rupture se produise suite à 1 million (10^6) de cycles [LPC & Setra 1994]. Cette valeur varie beaucoup d'un enrobé à l'autre en fonction de la fréquence et de la température [Rivière 1996]. Le LCPC emploie la valeur de la déformation correspondant à 1 million de cycles ε_6 à une température de 10°C et une fréquence de 25 Hz comme valeur admissible de déformation en tension à la base de l'enrobé dans sa méthode de conception [LPC & Setra 1994].

La droite de Whöler représente une probabilité de 50 % que la rupture se produise selon cette relation. Ce qui signifie qu'il y a autant de chances que le nombre de cycles obtenu lors d'un

essai soit plus grand ou plus petit que le nombre de cycles donné par le modèle. La probabilité associée au modèle se distribue selon une loi logarithmique normale. Il est possible de déterminer un modèle pour la conception qui soit fiable dans une plus grande proportion. Il suffit de multiplier le nombre de cycles par un facteur M exprimé par l'équation 2.17 tenant compte de la variabilité du modèle et des hypothèses du concepteur ainsi que du niveau de confiance que l'on désire pour la conception. Par exemple, les auteurs du programme de recherche SHRP suggèrent un niveau de confiance de 90% ($Z = 1,28$) et une variance de 0,3 pour les hypothèses de conception [Tayebali & al 1994, Harvey & al 1997].

$$M = e^{Z \sqrt{\text{VAR}(\ln N) + 0,3}} \quad (2.17)$$

Il est également possible de caractériser le comportement de l'enrobé sur une plage de température, si la température effective ou critique est inconnue. Les températures retenues pour la caractérisation seront des températures dites intermédiaires. Ce sont les températures où la majorité des dommages se produisent dû à leur fréquence d'occurrence et à la sensibilité de l'enrobé à ces températures. Les auteurs du SHRP proposent d'exprimer les constantes de régression de la relation de Whöler en fonction de la température selon le modèle des équations 2.18 et 2.19 [Tayebali & al 1994]. La pente m et l'ordonnée à l'origine b des équations 2.15 et 2.16 sont exprimées en fonction de la température T par des expressions linéaires dont les constantes A, B, C, D sont déterminées expérimentalement.

$$N = 10^{(C + DT)} (\varepsilon \text{ ou } \sigma)^{(A + BT)} \quad (2.18)$$

$$\log N = (A + BT) \log (\varepsilon \text{ ou } \sigma) + (C + DT) \quad (2.19)$$

2.7.2 Modes de sollicitation

L'essai de fatigue peut s'effectuer en imposant soit une amplitude de contrainte constante ou une amplitude de déformation constante. Dans le cas des essais à contrainte constante, la déformation augmente avec la diminution de la rigidité, alors que dans le cas des essais à déformation constante, la contrainte diminue avec la diminution de la rigidité. La figure 2.18 montre cette évolution de la contrainte et de la déformation pour les deux modes de sollicitation. En terme de

rigidité, ces deux modes classent inversement la résistance à la fatigue des enrobés. Tel que l'on peut le constater à la figure 2.19, un classement à déformation constante classe un enrobé plus rigide comme étant moins résistant à la fatigue. Dans le cas d'un classement à contrainte constante, un enrobé plus rigide résiste mieux à la fatigue [Brown 1978, Doan 1977].

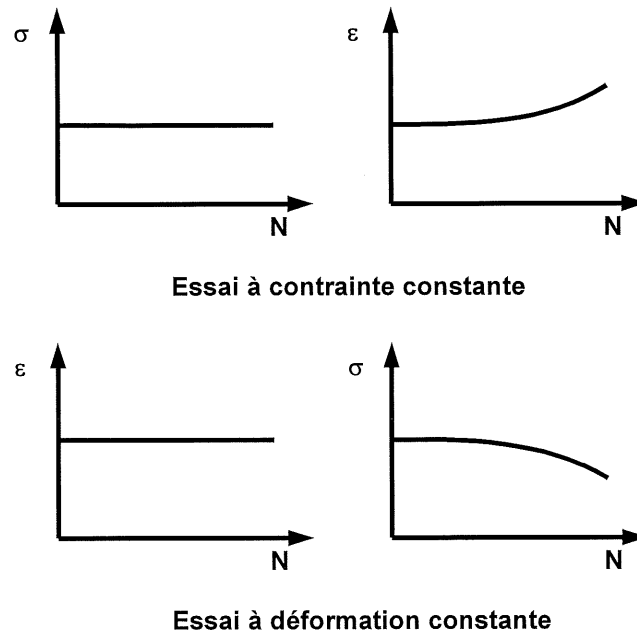


Figure 2.18 – Évolution de la déformation et de la contrainte en fonction du mode de sollicitation.

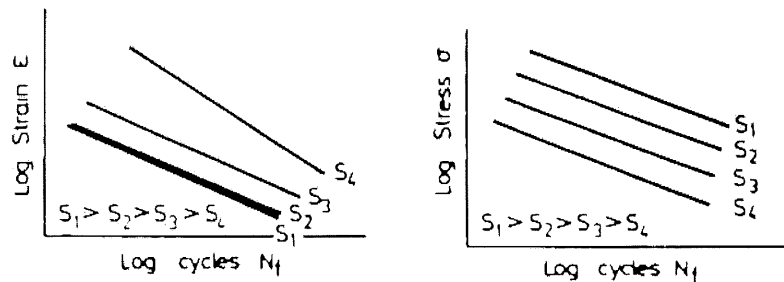


Figure 2.19 - Classement de la résistance à la fatigue en fonction du mode de sollicitation [Brown 1978].

Pour des conditions d'essai initiales similaires, la durée de vie de l'enrobé est généralement plus faible si l'essai est effectué avec une amplitude de contrainte constante [Deacon & al 1995].

Dans le cadre des études SHRP, les résultats ont indiqué que le nombre de cycles obtenu lors d'un essai à contrainte contrôlée est environ 2,4 fois inférieur à celui obtenu par un essai à déformation contrôlée [Tayebali & al 1994]. Cette différence de comportement entre les deux modes d'essai s'explique en terme de mécanisme de propagation des fissures. Une fois la fissure initiée, sa vitesse de propagation dépend de l'intensité de la contrainte appliquée. Si la contrainte est maintenue constante, la fissure se propage rapidement. Si la déformation est constante, la contrainte nécessaire pour maintenir le niveau de déformation diminue avec la diminution de la rigidité ce qui a pour effet de ralentir la propagation de la fissure [Brown 1978]. Selon Deacon & al ainsi que Di Benedetto & al, il semble que le mode d'essai à déformation constante représente mieux le mécanisme de la propagation des fissures tel qu'observé dans la réalité [Deacon & al 1995, Di Benedetto & al 1996].

Il est difficile de déterminer quel mode de sollicitation représente le mieux le comportement de l'enrobé. Certains auteurs recommandent des essais à contrainte constante pour les enrobés d'une épaisseur supérieure à 125 mm (5 po) et des essais à déformation constante pour une épaisseur inférieure à 75 mm (3 po) [Tayebali & al 1994]. Habituellement, on considère qu'un enrobé épais supporte la plus grande partie de la contrainte appliquée à la chaussée. Dans le cas d'un enrobé mince, on suppose que sa déformation est influencée par le comportement des couches sous-jacentes et qu'elle n'est pas affectée par la perte de rigidité de l'enrobé [Huang 1993]. Monismith & Salam a proposé une approche pour déterminer le mode de sollicitation de l'enrobé à chaque instant. Il s'agit du « Mode Factor » MF où les deux modes de sollicitation sont quantifiés en pourcentage selon l'équation 2.20 où A représente l'effet de la contrainte et B l'effet de la déformation. Un MF de 1 représente un cas de sollicitation à déformation contrôlée, cette situation s'applique aux enrobés peu rigides posés en couche mince. Un MF de -1 représente un cas de sollicitation à contrainte contrôlée, cette situation s'applique aux enrobés très rigides posés en couches épaisses [Monismith & Salam 1973].

$$MF = (A-B) / (A+B) \quad (2.20)$$

Par ailleurs, il semble que pour caractériser la résistance à la fatigue d'un enrobé, il ne suffit pas d'effectuer des essais en laboratoire en sélectionnant le bon mode de sollicitation. Une analyse mécanistique du comportement de la chaussée est également nécessaire afin de déterminer le niveau de contrainte ou de déformation critique de la chaussée. Si ce type d'analyse est inclus dans l'approche du problème, Deacon & al affirment que le mode de sollicitation employé en laboratoire n'influence pas le classement. Ils affirment que peu importe les résultats de la caractérisation, un enrobé très rigide offrira toujours une piètre performance en fatigue s'il est posé en couche mince (< 75 mm), mais offrira une bonne performance s'il est employé en couche épaisse (> 125 mm) et inversement pour un enrobé peu rigide [Deacon & al 1995].

2.7.3 Caractérisation

Pour caractériser la relation de Whöler d'un enrobé, on doit effectuer des essais à différents niveaux de sollicitations pour obtenir différents nombres de cycles à la rupture. Par exemple, le programme de recherche SHRP propose une caractérisation qui s'effectue en quatre étapes sur une période ne dépassant pas 24 heures [Tayebali & al 1994]. Elle permet une caractérisation rapide de l'enrobé tout en conservant un niveau de précision acceptable. Les essais sont effectués à déformation constante avec une fréquence de 10 Hz et une température de 20°C. Le premier essai s'effectue à un niveau de déformation se situant entre 800 et 1000 $\mu\text{m/m}$. Ce niveau de déformation devrait exiger entre 5 000 et 10 000 cycles pour atteindre la rupture. Pour le deuxième essai, on impose un niveau de déformation afin d'obtenir un nombre de cycles à la rupture d'environ 35 000. Une fois le deuxième essai complété, on détermine la relation de Whöler entre les deux résultats. À partir de cette relation, on estime le troisième niveau de déformation correspondant à un nombre de cycles à la rupture de 100 000. Finalement, de la relation tirée des trois résultats, on détermine le niveau de déformation nécessaire pour que la rupture se produise entre 350 000 et 500 000 cycles. On retrouve un résumé de cette procédure et les temps estimés pour chaque essai au tableau 2.4.

Tableau 2.4 - Routine d'essai rapide proposée par le programme SHRP.

Essai	Niveau de déformation	Temps
Essai 1	$800 < \varepsilon < 1000 \text{ } \mu\text{m/m}$	½ heure
Essai 2	estimer ε pour $N = 35\,000$ cycles	1 heure
Essai 3	tracer la droite des essais 1 et 2 estimer ε pour $N = 100\,000$ cycles	3 heures
Essai 4	tracer la droite des essais 1, 2 et 3 estimer ε pour $N = 350\,000$ à $500\,000$ cycles	10 à 14 heures

Concernant cette approche, Tayebali & al spécifient qu'un plus grand nombre d'essai est nécessaire pour caractériser un enrobé ayant un comportement atypique ou pour augmenter la fiabilité d'un modèle conventionnel [Tayebali & al 1994]. Harvey & Tsai préfèrent caractériser le comportement de l'enrobé avec uniquement deux niveaux de déformation pour lesquels ils effectuent deux ou trois essais à chaque niveau [Harvey & Tsai 1996]. Les travaux du SHRP ont fait ressortir l'effet des répliques sur la variance associée au modèle. Pour un même nombre d'essais, diminuer le nombre de niveau de sollicitation au profit d'un plus grand nombre de répliques par niveau diminue la variance du modèle [Tayebali & al 1994].

2.7.4 Évolution de certains paramètres

Il existe plusieurs paramètres par lesquels on peut suivre l'évolution de la dégradation par fatigue d'un enrobé en laboratoire. Il est principalement possible de suivre l'évolution de la rigidité, de l'angle de phase ainsi que de l'énergie dissipée suite à chaque cycle de chargement. L'évolution de ces paramètres permet de décrire le processus d'endommagement par fatigue de l'enrobé.

2.7.4.1 Rigidité

Lors d'un essai de fatigue, la rigidité de l'enrobé diminue avec l'accumulation du nombre de cycles jusqu'à ce que la rupture soit imminente. Il semble que peu importe le mode de sollicitation imposé, l'évolution de la rigidité se divise en trois phases identifiées à la figure 2.20 [Piau 1989]. Lors de la phase I, il y a échauffement et sollicitation par fatigue de l'échantillon mais l'échauffement est l'effet prédominant. La température se stabilise lors de la phase II et l'endommagement se fait principalement par fatigue. Il y a dégradation rapide de l'échantillon pendant la phase III [Di Benedetto 1996]. L'étude de l'évolution de la température dans l'échantillon lors d'un essai de fatigue effectuée par De la Roche et Marsac confirme cette

description des trois phases. Lors de la première phase, il y a augmentation rapide de la température qui correspond à une réduction accélérée de la rigidité. Lors de la seconde phase, on se retrouve en régime permanent de température et il y a décroissance graduelle et constante de la rigidité. À la troisième phase, on observe une concentration de chaleur dans la zone de sollicitation maximale et une diminution de la température moyenne sur la zone de fissuration, la rigidité décroît alors rapidement [De la Roche & Marsac 1996].

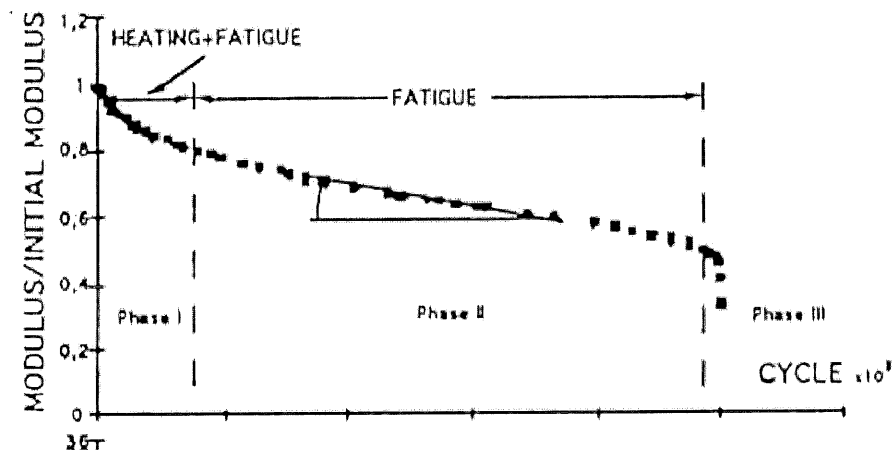


Figure 2.20 - Évolution de la rigidité lors d'un essai de fatigue [Di Benedetto & al 1996].

Selon Di Benedetto & al, il semble qu'un problème majeur d'interprétation des résultats des essais de fatigue soit attribuable à l'échauffement du matériau au début de l'essai [Di Benedetto & al 1996]. Le critère usuel de rupture, qui consiste en la diminution de la moitié de la rigidité initiale, inclut la diminution de la rigidité liée à l'échauffement enregistré lors de la phase I [De la Roche et Marsac 1996]. On estime que plus du tiers de la caractérisation inclut la première phase qui est liée aux caractéristiques thermiques du matériau et non à sa résistance à la fatigue. Di Benedetto & al suggèrent d'employer uniquement la deuxième phase de l'évolution de la rigidité pour caractériser le comportement de l'enrobé. De ce fait, Kong Kam Wa & al ainsi que Di Benedetto & al ont suggéré une nouvelle approche pour déterminer la rigidité initiale de l'enrobé. Ils proposent d'extrapoler la section linéaire de l'évolution de la rigidité lors de la phase II jusqu'à l'origine, comme le montre la figure 2.21. Cette approche permet de caractériser la

rigidité initiale dans le cas où la température de l'enrobé serait constante au cours de l'essai [Di Benedetto & al 1996, Kong Kam Wa & al 1997].

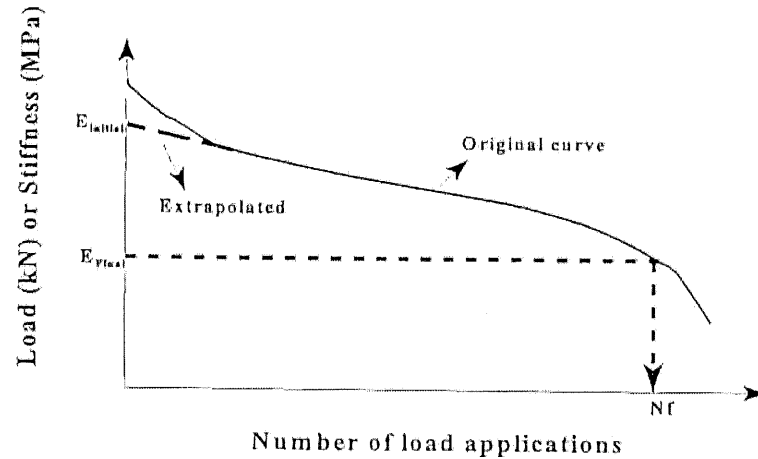


Figure 2.21 - Détermination de la rigidité initiale sans tenir compte de l'échauffement [Kong Kam Wa & al 1997].

2.7.4.2 Angle de phase

L'angle de phase est un autre paramètre dont on peut suivre l'évolution lors d'un essai de fatigue. L'angle de phase augmente avec le nombre de cycles jusqu'à un certain point où il semble diminuer, tel que l'on peut le constater à la figure 2.22 où l'on retrouve l'évolution de l'angle de phase en parallèle avec la rigidité. Reese explique qu'avec l'accumulation des fissures dans l'échantillon, l'élasticité de l'enrobé diminue, ce qui a pour effet d'augmenter l'angle de phase. Lorsque l'échantillon ne peut plus accumuler de dommages, l'angle de phase cesse d'augmenter pour se mettre à diminuer. Reese considère que ce point caractéristique dans l'évolution de l'angle de phase indique la rupture de l'échantillon [Reese 1997].

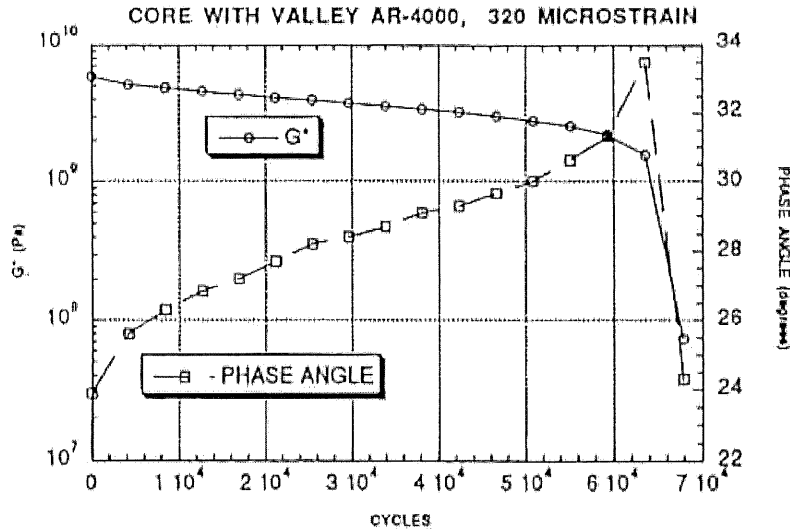


Figure 2.22 - Évolution de l'angle de phase lors d'un essai de fatigue en parallèle avec l'évolution de la rigidité [Reese 1997].

2.7.4.3 Energie dissipée

L'énergie dissipée par cycle correspond à la surface délimitée par la boucle d'hystérésis, comme le montre la figure 2.23 pour un cycle de chargement. La boucle d'hystérésis est constituée de deux courbes, soit la courbe supérieure qui représente le cheminement de la sollicitation lors de l'application de la charge et la courbe inférieure qui représente le cheminement de la sollicitation lorsque le matériau revient à son état initial ou quasi-initial s'il y a endommagement. La surface sous les courbes représente l'énergie nécessaire pour effectuer le cheminement de sollicitation et la différence entre les deux surfaces représente l'énergie dissipée lors d'un cycle de chargement. L'énergie dissipée à chaque cycle diminue lorsque l'essai est effectué à déformation constante alors qu'elle augmente lorsque l'essai est effectué à contrainte constante ce qui montre qu'un essai à contrainte constante est plus aggravant pour l'enrobé. On peut calculer l'énergie dissipée à chaque cycle à l'aide de l'équation 2.21 qui est exprimé en fonction de la déformation ϵ , de la contrainte σ et de l'angle de phase ϕ . Cette équation est valide pour un chargement sinusoïdal strictement en tension « haversine ».

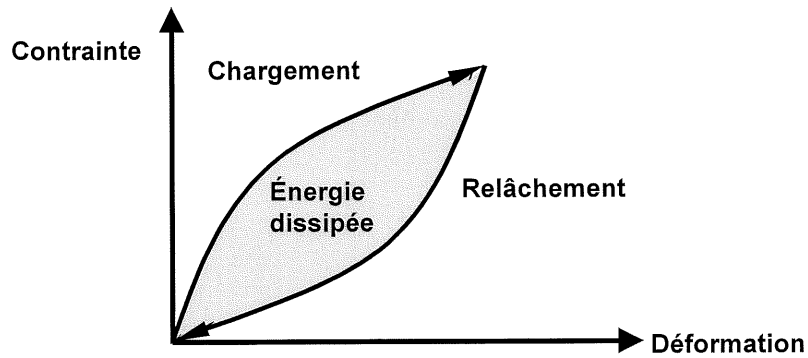


Figure 2.23 - Boucle d'hystérésis [Rivière 1996].

$$\text{Énergie dissipée} = 0,25 \pi \varepsilon \sigma \sin(\phi) \quad (2.21)$$

La figure 2.24 présente le rapport entre l'énergie dissipée lors d'un cycle et l'énergie dissipée cumulée jusqu'à ce cycle. On remarque deux phases distinctes sur cette représentation. Certains auteurs identifient la première phase comme la phase d'initiation des fissures et la suivante comme la phase de propagation des fissures [Pronk 1997, Little & al 1997]. Hopman & al suggèrent de considérer le moment où la première section de la courbe cesse d'être une droite comme le point de rupture de l'échantillon [Hopman & al 1989].

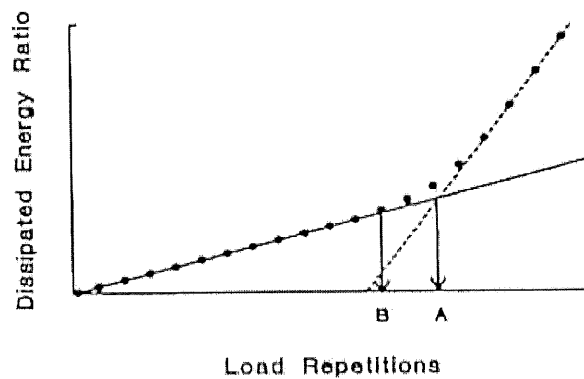


Figure 2.24 - Évolution de l'énergie dissipée lors d'un essai de fatigue [Pronk 1997].

2.7.5 Période de repos

De nombreuses recherches au sujet de la résistance à la fatigue des enrobés en laboratoire ont porté sur l'influence d'un temps de repos entre l'application des chargements. L'ajout d'une période de repos entre les cycles augmente la durée de vie de l'échantillon en permettant à la chaleur produite de se dégager et à la fissure initiée de se cicatriser. Plus le temps de repos est grand et plus le gain est grand. L'amélioration de la durée de vie est plus marquée lors d'essais à contrainte imposée [Bonnaure & al 1983, Pronk 1997]. L'inclusion d'une période de repos entre les chargements peut augmenter la durée de vie de l'échantillon de 10 à 17 fois [Little & al 1997].

Le processus de cicatrisation des fissures est communément appelé « autoréparation ». Saunier a démontré le phénomène d'autoréparation des enrobés. Il a sollicité en traction des éprouvettes d'enrobé jusqu'à leur rupture. Par la suite, il a remis en contact à l'aide d'une pression les deux sections obtenues et a effectué un nouvel essai de traction après un certain temps. Il a constaté que l'effort nécessaire pour briser une seconde fois l'éprouvette est de 80 à 100% l'effort fournit la première fois [Saunier 1968]. Pronk a démontré par l'application d'une charge minime au cours de la période de repos qu'il y a effectivement une augmentation de la rigidité au cours de cette période. Par ailleurs, la diminution de la rigidité lors de l'application d'un nouveau chargement se fait plus rapidement que la première fois. Seulement après une très longue période de repos, le matériau se comportera comme un matériau qui n'a pas subi de dommage [Pronk 1997].

L'autoréparation est une propriété des matériaux visqueux qui est encore méconnue. De la Roche & Rivière considèrent que l'ajout de temps de repos n'aide pas à mieux comprendre le comportement d'un enrobé en fatigue [De la Roche et Rivière 1997]. De plus, des études ont démontré que pour éliminer l'effet de l'échauffement sur les résultats, la période de repos devrait être très longue. Dans le cas d'un échantillon cylindrique de 80 mm de diamètre et 120 mm de hauteur, Di Benedetto & al ont déterminé que la moitié de la variation de la température est récupérée après 1000 secondes. Pour cette raison, il ne semble pas concevable d'inclure une période de repos entre les cycles de chargement [Di Benedetto & al 1996].

2.8 Influence des paramètres de formulation

La rigidité de l'enrobé ainsi que sa résistance à la fatigue sont influencées par ses constituants et l'environnement auquel il est confronté. Cette section présente l'influence de différents paramètres de formulation, paramètres sur lesquels le concepteur peut exercer un contrôle.

2.8.1 Compacité

La compacité de l'enrobé est l'un des facteurs prédominant sur la rigidité et la résistance à la fatigue de l'enrobé. Une forte compacité augmente la rigidité et la résistance à la fatigue de l'enrobé, peu importe le mode de sollicitation auquel il est soumis [Soliman 1976]. Les vides sont des zones où la fissuration peut s'initier et se propager rapidement [Deacon & al 1995]. Il est donc important d'obtenir une compacité suffisante de l'enrobé lors de la mise en chantier. Tayebali & al ont constaté qu'un enrobé avec une teneur en vides de 8% présente une résistance à la fatigue de 40 % inférieure à celle d'un enrobé avec une teneur en vides de 4,5% [Tayebali & al 1994]. L'effet des vides est moins prononcé dans le cas d'essais à déformation contrôlée [Myre 1992].

2.8.2 Nature du bitume

La nature du bitume définit les propriétés thermiques et rhéologiques de l'enrobé. Lorsque le bitume est dur, l'enrobé a une rigidité élevée et est moins sensible aux conditions de températures et de chargement. À l'opposé, lorsque le bitume est mou, l'enrobé devient moins rigide et plus sensible [Rivière 1996]. La provenance de bitumes d'une même pénétration peut modifier par un rapport de 20 la durée de vie d'un enrobé.

2.8.3 Teneur en bitume

La teneur en bitume a une grande influence sur le comportement de l'enrobé. Il semble exister une teneur en bitume qui donne une rigidité optimale, mais cette valeur ne correspond pas à la plus grande valeur de densité. La rigidité diminue si l'on dépasse cette teneur même si la compacité augmente pour une même énergie de compactage [Soliman 1976]. Par ailleurs, la

résistance à la fatigue de l'enrobé augmente avec l'augmentation de la teneur en bitume pour des essais à déformation constante. Selon Cooper & Pell, il existe une teneur en bitume où la rigidité et la résistance à la fatigue sont maximales pour des essais à contrainte constante [Cooper & Pell 1969]. Tayebali & al ont constaté qu'un enrobé formulé avec une teneur en bitume de 6 % peut présenter une résistance à la fatigue 70% supérieure à un enrobé identique formulé avec une teneur en bitume de 4,5% [Tayebali & al 1994].

2.8.4 Teneur en fines

Il existe une teneur en fines ($< 80 \mu\text{m}$) optimale pour une teneur en bitume déterminée qui correspond à une rigidité et une résistance à la fatigue maximale. Par exemple, en France, un rapport de 2 est employé pour la conception des graves-bitume, ce qui signifie habituellement 7% de fines pour 3,5% de bitume [Soliman 1976].

2.8.5 Angularité

L'angularité des granulats n'a pas d'influence directe sur la résistance à la fatigue et la rigidité de l'enrobé. Elle influence plutôt la compacité du mélange [Soliman 1976]. Cooper & Pell affirment que l'emploi de sable roulé permet d'augmenter la compacité pour une même énergie de compactage et par conséquent, la résistance à la fatigue. Par ailleurs, l'ajout de sable roulé rend l'enrobé plus maniable ce qui diminue la rigidité malgré le gain de compacité [Cooper & Pell 1969].

2.8.6 Granulométrie

Doan a montré qu'un enrobé semi-grenu est plus résistant à la fatigue qu'un enrobé grenu [Doan 1977]. Soussa & al affirment qu'une granulométrie passant sous la zone de restriction Superpave semble obtenir de meilleurs résultats en fatigue qu'une granulométrie passant au-dessus de la zone [Soussa & al 1998].

2.8.7 Fibres

L'utilisation de fibres augmente la résistance à la fatigue de l'enrobé. Huang & White ont démontré que l'ajout de 2,2 kg de fibres de polypropylène dans une tonne d'enrobé double la

résistance à la fatigue de l'enrobé [Huang & White 1996]. L'addition de fibres d'acier ne semble pas apporter d'effet bénéfique à la résistance à la fatigue [Myre 1992].

2.9 Influence des paramètres environnementaux

Le comportement d'un enrobé est influencé par le temps de chargement et la température qui sont des paramètres externes sur lesquels le concepteur a peu de contrôle. Lors de la caractérisation d'un enrobé, on doit tenir compte de ces paramètres afin de connaître sa réaction face à l'environnement où il aura à interagir. Cette section discute de l'effet de la température et de la fréquence de chargement sur la caractérisation en laboratoire ainsi que de l'effet du vieillissement sur la route.

2.9.1 Température

La température est le paramètre extérieur qui influence le plus le comportement d'un enrobé. L'augmentation de la température diminue la rigidité de l'enrobé, ce qui améliore ou diminue sa résistance à la fatigue selon le mode de sollicitation étudié. Di Benedetto & al affirment qu'une variation de 1°C peut faire varier la rigidité de 10 % [Di Benedetto & al 1996]. La déformation en tension admissible en fatigue pour un enrobé augmente en fonction de la température. L'analyse des essais du programme SHRP a démontré que la température influençait également la pente de la relation de Whöler [Tayebali & al 1994].

2.9.2 Fréquence

Un autre facteur qui influence le comportement de l'enrobé est le temps de chargement. L'essai en tient compte par le biais de la fréquence d'application de la sollicitation. Selon Rao Tangella, basé sur une étude de McLean, il semble qu'une fréquence située entre 10 et 25 Hz est convenable pour l'étude de la fatigue des enrobés [Rao Tangella & al 1990]. On retrouve à la figure 2.25 la représentation de McLean où le temps de chargement est exprimé en fonction de la vitesse du véhicule et de l'épaisseur d'enrobé pour un chargement de forme carrée [McLean 1974]. La courbe à 30 mph est comparée à un chargement de forme triangulaire à la même vitesse établit par Barksdale. La figure 2.26 présente les temps de chargement déterminés par

Barksdale pour une onde de forme sinusoïdale et triangulaire [Barksdale 1971]. Raithby & Sterling considère que la forme du signal appliqué, qu'elle soit triangulaire, carrée ou sinusoïdale, n'affecte pas la résistance à la fatigue de l'enrobé [Raithby & Sterling 1972].

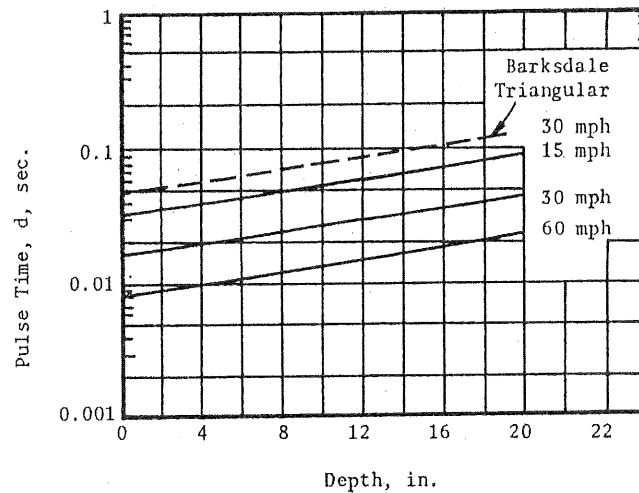


Figure 2.25 – Temps de chargement lors du passage d'un véhicule en fonction de la profondeur pour un chargement de forme carrée [McLean 1974].

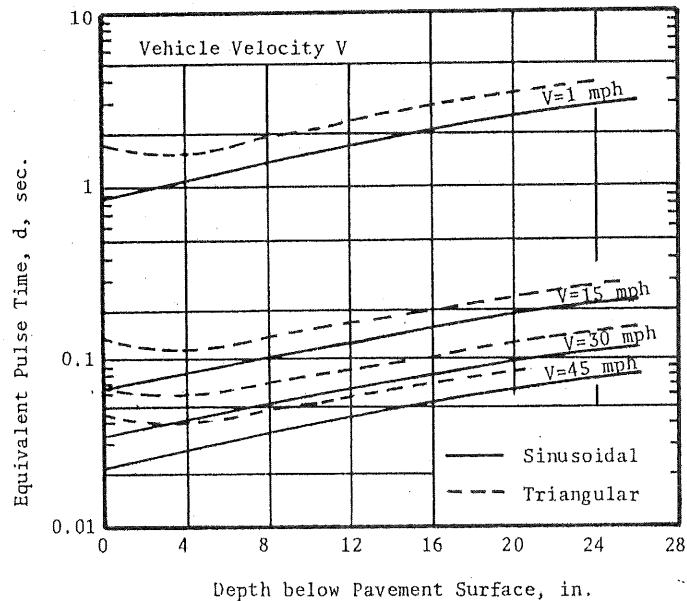


Figure 2.26 – Temps de chargement lors du passage d'un véhicule en fonction de la profondeur pour un chargement de forme triangulaire et sinusoïdale [Barksdale 1971].

Le programme SHRP suggère une fréquence de 10 Hz alors que le LCPC travail avec 25 Hz pour la caractérisation en fatigue et 10 Hz pour la caractérisation de la rigidité. Par ailleurs, le LCPC postule que la correction entre 10 et 25 Hz sur la valeur de ϵ_6 peut être négligée pour des températures moyennes [LPC & Setra 1994]. Le LCPC considère usuellement que les couches d'assises sont sollicitées à une fréquence de 10 Hz [LPC & Setra 1994].

2.9.3 Vieillessement

On sait que le bitume s'oxyde avec le temps ce qui a pour effet d'augmenter la rigidité de l'enrobé. Ainsi, l'augmentation de la rigidité diminue la valeur de la déformation en tension appliquée par le trafic. Le résultat est une résistance à la fatigue accrue avec les années, une affirmation que supporte plusieurs auteurs [Rao Tangella p.20 (Epps), Nunn 1997]. Une autre forme de vieillissement qui influence la rigidité et la résistance à la fatigue est la densification de l'enrobé par le trafic. Raithby & Ramshaw [Rao Tangella p.20] ont montré que la compacité amenée par le trafic pouvait multiplier par trois la résistance à la fatigue de l'enrobé et augmenter de 60 % sa rigidité.

2.10 Modèles de la littérature

Plusieurs agences de transport et groupes de recherche se sont intéressés au développement de modèles prédictifs de la performance des enrobés, soit en terme de rigidité ou de résistance à la fatigue. Les modèles permettent d'effectuer la conception des chaussées sans constamment avoir recours aux essais de laboratoire.

2.10.1 Rigidité

Il existe une multitude de formes que peut prendre une équation pour exprimer la rigidité d'un enrobé. Ces équations sont généralement présentées en fonction de la température. Par exemple, on peut présenter les modèles de Ullidtz (1987) et de Baltzer & Jansen (1994) aux équations 2.22 et 2.23. Le modèle de Ullidtz présente la rigidité en fonction du logarithme de la température ce qui restreint le modèle à des valeurs de température positives. À l'inverse, le modèle de Baltzer

& Jansen présente le logarithme de la rigidité en fonction de la température ce qui permet de travailler avec des températures négatives.

$$E = 15\,000 - 7\,900 \times \log T \quad (2.22)$$

$$\log E = 4,2 - 0,018 \times T \quad (2.23)$$

E = module dynamique de l'enrobé (MPa)

T = température de l'enrobé (°C)

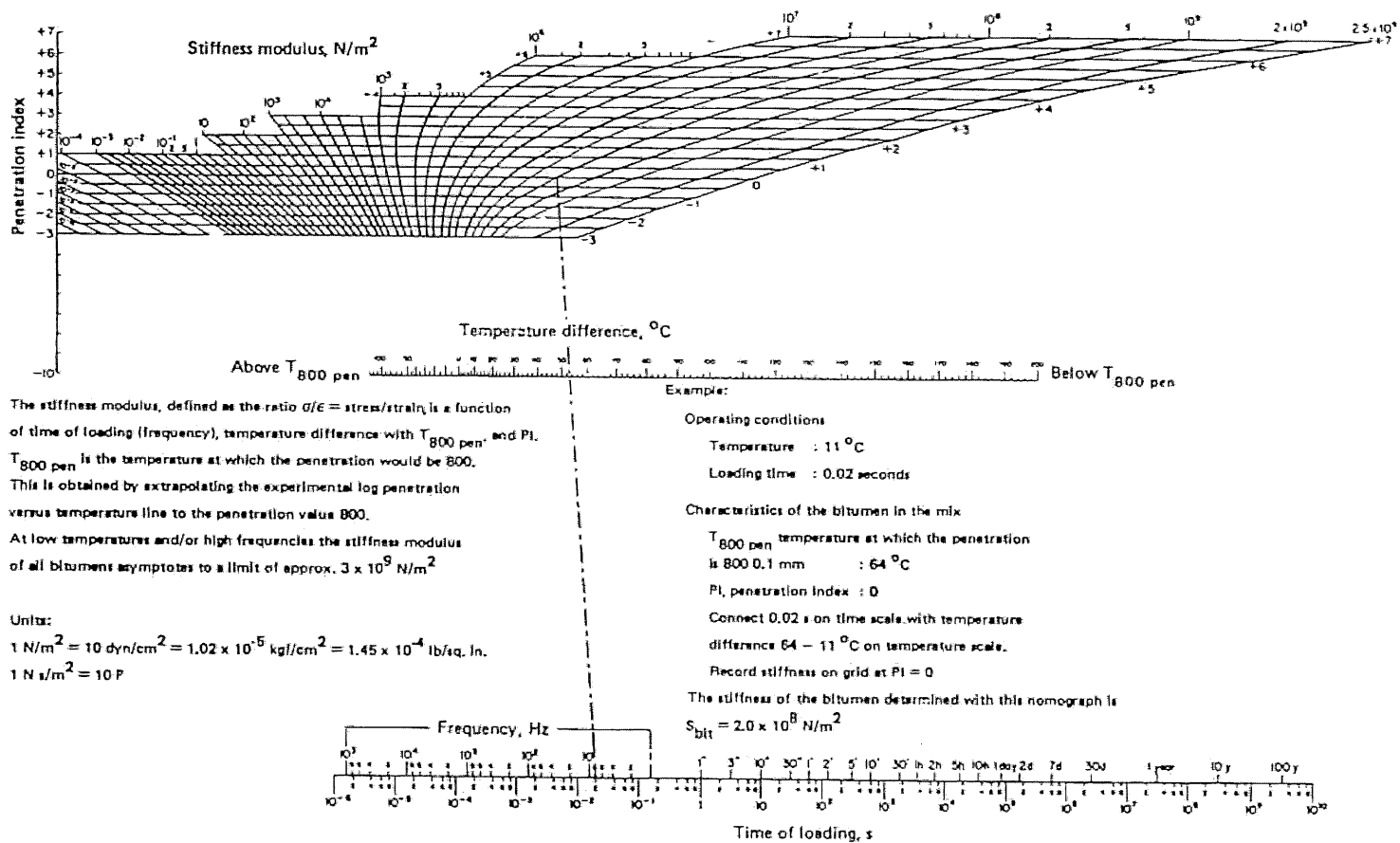
La compagnie pétrolière Shell a développé en 1977 une méthode graphique par « nomographes » pour déterminer la rigidité dynamique des enrobés [Bonnaure & al 1977]. Cette méthode est basée sur les propriétés du bitume ainsi que sur les proportions en volume de bitume V_b et de granulats V_g présent dans l'enrobé. On emploie deux « nomographes », soit le premier pour déterminer la rigidité du bitume, à la figure 2.27, et le second pour déterminer la rigidité de l'enrobé, à la figure 2.28. Pour employer le premier nomographe, il faut connaître le point de ramollissement du bitume déterminé selon l'essai de bille et anneau « Ring and Ball » décrit par la norme AASHTO T53-84 « Softening point of asphalt (bitumen) and tar in ethylene glycol ». Cet essai caractérise une température de référence T_{RB} à laquelle tous les bitumes ont une même viscosité ou une même pénétration d'environ 800. On doit également connaître l'indice de pénétration du bitume PI « Penetration Index » déterminé selon l'équation 2.24.

$$PI = \frac{20 - 500 A}{1 + 50 A} \quad (2.24)$$

$$A = \frac{\log (\text{pen à } T_1) - \log (\text{pen à } T_2)}{(T_1 - T_2)}$$

T_1, T_2 = température à laquelle est mesurée la pénétration (°C)

Figure 2.27 – Nomographe pour déterminer la rigidité des bitumes [Van der Poel 1954]



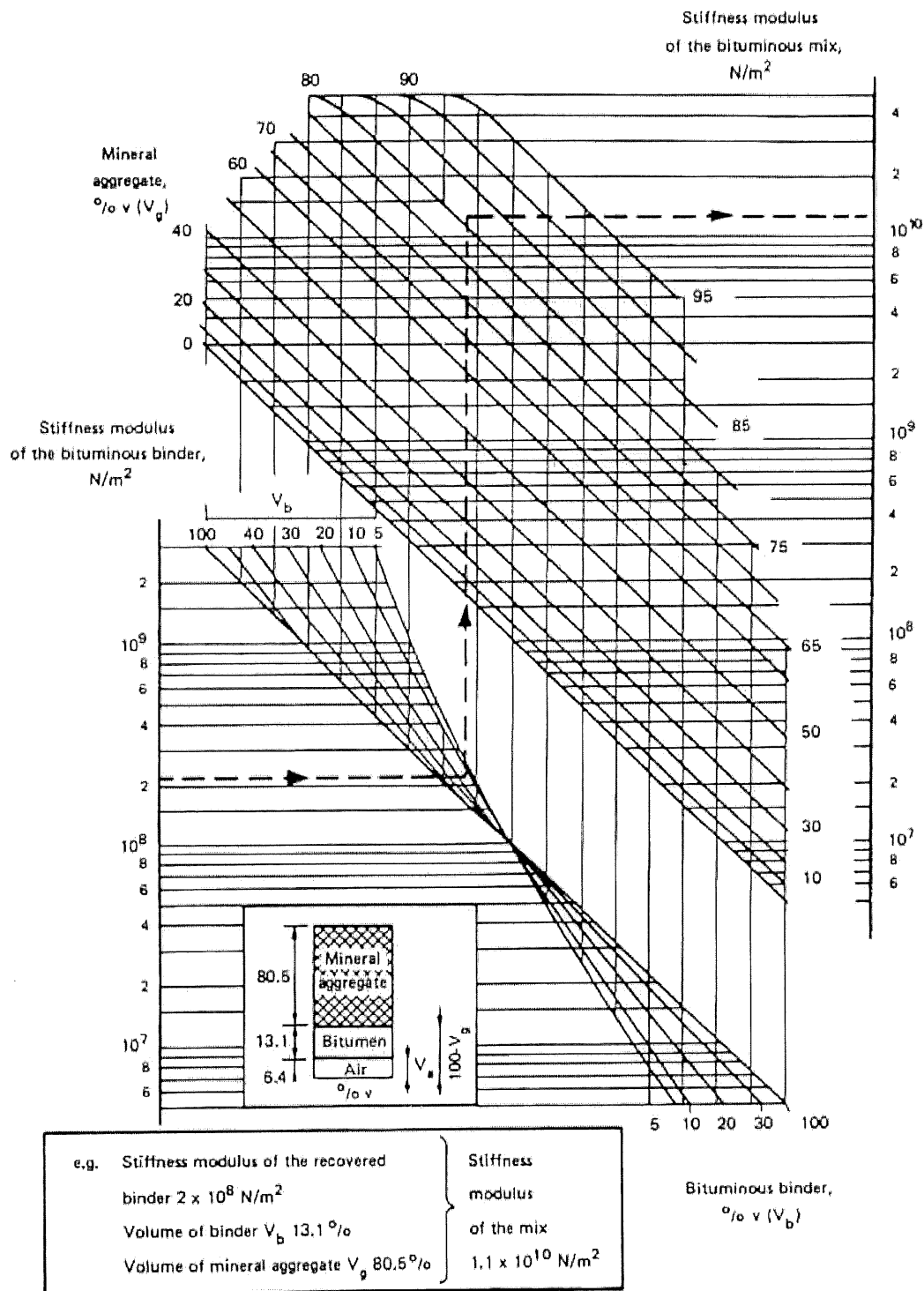


Figure 2.28 – Nomographe pour déterminer la rigidité des enrobés [Shell 1978].

Le nomographe pour déterminer la rigidité des enrobés a également été exprimé sous forme d'équation par Bonnaure [Bonnaure 1977]. L'équation 2.25 reproduit cette équation qui nécessite les valeurs de volume de bitume V_b et de granulat V_g présent dans l'enrobé ainsi que la valeur de rigidité du bitume déterminée par le nomographe de la figure 2.27.

$$\text{Log } E = \frac{K_4 + K_3}{2} (\log E - 8) + \frac{K_4 - K_3}{2} |\log E - 8| + K_2 \quad (2.25)$$

$$K_1 = 10,82 - \frac{1,342 (100 - V_g)}{V_g + V_b}$$

$$K_2 = 8,0 + 0,00568 V_g + 0,0002135 V_g^2$$

$$K_3 = 0,6 \log \frac{1,37 V_b^2 - 1}{1,33 V_b - 1}$$

$$K_4 = 0,7582 (K_1 - K_2)$$

$$V_g = \text{volume de granulat (\%)}$$

$$V_b = \text{volume de bitume (\%)}$$

Le modèle de rigidité dynamique de l'Asphalt Institute est également largement employé pour la conception. Il s'agit d'un modèle développé par une équipe menée par Witczak depuis 25 ans. Le modèle présenté par l'équation 2.26 ne correspond pas au modèle que l'on retrouve dans le guide de conception de l'Asphalt Institute. Ce guide présente un modèle que Witczak catégorise dans la quatrième génération. Le modèle présenté dans cette revue de littérature est plus récent et fait partie de la cinquième génération [Witczak & Fonseca 1996]. Il est basé sur 1 429 essais dynamiques effectués sur 149 enrobés différents. Ce modèle est valide pour une plage de température entre 5°C et 40°C.

$$\begin{aligned} \text{Log } E = & -0,261 + 0,008225 p_{200} - 0,00000101 p_{200}^2 \\ & + 0,00196 p_4 - 0,03157 V_a - 0,415 V_{be} / (V_{be} + V_a) \\ & + \frac{(1,87 + 0,002808 p_4 + 0,0000404 p_{38} - 0,0001786 p_{38}^2 + 0,0164 p_{34})}{1 + e^{(-0,716 \log f - 0,7425 \log \eta)}} \end{aligned} \quad (2.26)$$

E = module dynamique de l'enrobé (10^5 psi)

η = viscosité du bitume (10^6 poise)

f = fréquence de chargement (Hz)

V_a = volume des vides (%)

V_{be} = volume de bitume effectif (%)

p_{34} = masse totale cumulative de granulats retenue sur le tamis 3/4 po. (%)

p_{38} = masse totale cumulative de granulats retenue sur le tamis 3/8 po. (%)

p_4 = masse totale cumulative de granulats retenue sur le tamis no. 4 (%)

p_{200} = masse totale cumulative de granulats retenue sur le tamis no. 200 (%)

2.10.2 Résistance à la fatigue

L'essai de fatigue est long à réaliser et destructif, ce qui rend particulièrement intéressant l'utilisation de modèles pour la prédiction de la résistance à la fatigue des enrobés. Ainsi, il existe une grande variété de modèles pour estimer le nombre de cycles nécessaire pour atteindre la rupture par fatigue d'un enrobé basé sur la valeur de déformation en tension à la base du revêtement. Les modèles proposés sont calibrés en laboratoire et nécessitent un certain facteur d'ajustement pour tenir compte des conditions de chargement qui prévalent sur la route. Plusieurs agences de transports ont développé des modèles sous la forme classique de Whöler. Ces modèles sont inutilisables hors de leur contexte puisqu'ils ne tiennent pas compte du type d'enrobé étudié et des conditions de chargement. Ainsi, uniquement des modèles généraux sont présentés dans cette section.

Le centre de recherche en route de Belgique a développé en 1974 un modèle pour prédire la résistance à la fatigue des enrobés basé sur la caractérisation de 42 types d'enrobés [Francken & Verstraeten 1974]. Les enrobés ont été caractérisés par des essais de flexion effectués à contrainte

contrôlée sur des poutres trapézoïdales. Le modèle est présenté à l'équation 2.27. Ce modèle est indépendant de la fréquence et de la température. Le nombre de cycles donné par l'équation doit être multiplié par un facteur de 6 pour estimer le nombre d'application sur la route. Le coefficient λ est fonction de la teneur en asphaltène du bitume et se détermine à partir du graphique de la figure 2.29 [Francken & Verstraeten 1974].

$$\varepsilon = \lambda G [V_b / (V_b + V_v)] [N / 10^6]^{-0,21} \quad (2.27)$$

ε = déformation initiale

N = nombre de cycles à la rupture

λ = coefficient dépendant de la teneur en asphaltène dans le bitume [figure 2.29]

G = facteur empirique dépendant des granulats [pour la plupart des enrobés $G=1$]

V_b = teneur volumique en bitume (%)

V_a = teneur volumique en vides (%)

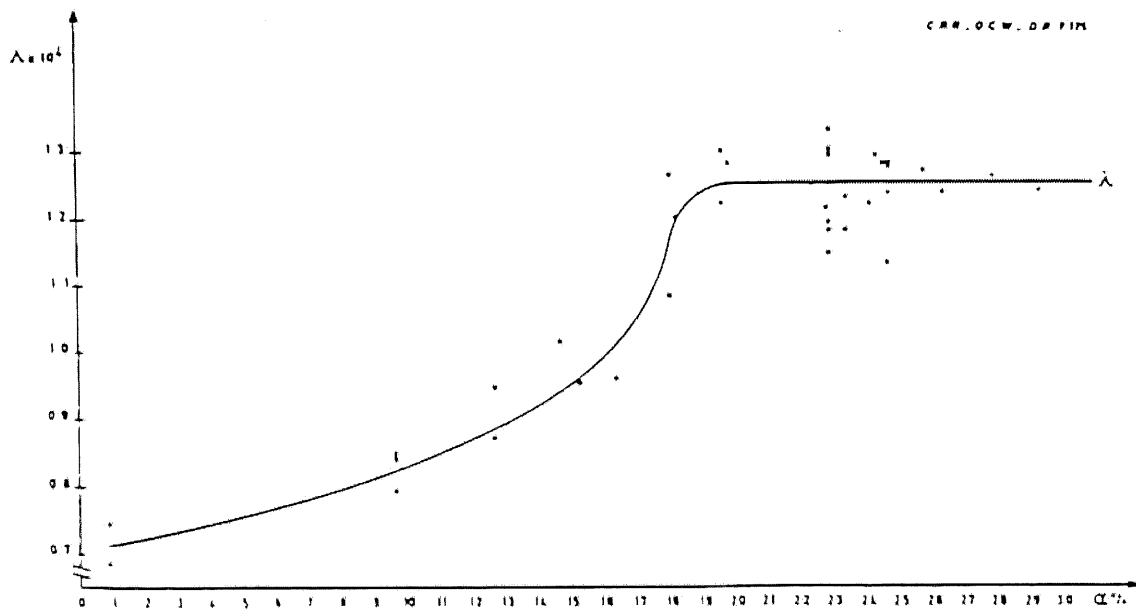


Figure 2.29 – Variation de λ en fonction de la teneur en asphaltène α dans le bitume [Francken & Verstraeten 1974].

Le Centre de Recherche Shell à Grand-Couronne en France a présenté en 1980 une méthode pour prédire la résistance à la fatigue des enrobés [Bonnaure & al 1980]. Cette méthode est basée sur l'analyse de 146 équations de fatigue, soit 75 équations développées à contrainte constante et 71 équations développées à déformation constante. Ainsi, un modèle a été développé pour les essais à contrainte constante à l'équation 2.28 et un modèle a été développé pour les essais à déformation constante à l'équation 2.29. La rigidité E de l'enrobé est déterminée à partir du « nomographe » proposé par Shell en 1978 reproduit à la figure 2.28 [Shell 1978].

$$\varepsilon = [0,300 \text{ PI} - 0,015 \text{ PI } V_b + 0,080 V_b - 0,198] E^{-0,28} N^{-0,2} \quad (2.28)$$

$$\varepsilon = [4,102 \text{ PI} - 0,205 \text{ PI } V_b + 1,094 V_b - 2,707] E^{-0,36} N^{-0,2} \quad (2.29)$$

ε = déformation initiale ou déformation constante

N = nombre de cycles à la rupture

PI = indice de pénétration du bitume

V_b = teneur volumétrique en bitume (%)

E = rigidité de l'enrobé (N/m²) [figure 2.28]

La neuvième édition du guide de conception « Asphalt Institute Design Manual (MS-1) » publiée en 1982 est basée sur une approche mécanistique [The Asphalt Institute 1982]. Ainsi, un modèle est proposé à l'équation 2.30 pour estimer le nombre de cycles de chargement nécessaire pour atteindre une fissuration par fatigue de 20% sur la surface totale d'enrobé basé sur le niveau de déformation en tension à la base de l'enrobé. Ce modèle est basé sur les résultats d'essais de laboratoire et sur des observations effectuées sur certaines sections de l'AASHO Road Test. La rigidité de l'enrobé est déterminée à partir du « nomographe » de la figure 2.28 proposé par Shell [Shell 1978]. Le nombre de cycles prédit par le modèle doit être multiplié par 18,4 pour tenir compte des variations entre les conditions de laboratoire et sur la route.

$$N = 0,00432 C \varepsilon^{-3,291} E^{-0,854} \quad (2.30)$$

ε = déformation en tension à la base du revêtement (microdéformation)

N = nombre de cycles (millions)

E = rigidité de l'enrobé (MPa) [figure 2.28]

$C = 10^M$ où $M = 4,84 [V_b / (V_a + V_b) - 0,69]$

V_b = teneur volumique en bitume (%)

V_a = teneur volumique en vides (%)

Les nombreux essais de rotation en flexion effectués par l'Université de Nottingham ont mené en 1987 à l'élaboration du modèle présenté par l'équation 2.31 [Brunton & al 1987]. Ce modèle est valide uniquement pour décrire des essais à contrainte contrôlée effectués à 10°C. Un facteur K est inclus au modèle pour permettre la prédiction du nombre de chargement soit pour atteindre un état de dégradation critique pour le revêtement ou un état terminal. L'état critique correspond à l'apparition de la première fissure dans la trace de roue alors que l'état terminal correspond à une quantité importante de fissuration. Le nombre de cycle donné par le modèle doit être multiplié soit par 440 pour estimer le nombre de chargement sur la route pour atteindre la rupture ou par 77 pour estimer le nombre de chargement pour atteindre l'état critique.

$$\text{Log } \varepsilon = \frac{14,39 \log V_b + 24,2 \log SP_i - K - \log N}{5,13 \log V_b + 8,63 \log SP_i - 15,8} \quad (2.31)$$

ε = déformation en tension à la base du revêtement (microdéformation)

N = nombre de cycles (millions)

V_b = teneur volumétrique en bitume (%)

SP_i = point de ramollissement initial du bitume (°C)

K = 46,82 pour l'état critique ou 46,06 pour la rupture

Myre a développé en 1992 un modèle pour les enrobés employés en Norvège à partir de résultats obtenus par des essais de flexion avec chargement unique au centre de la poutre [Myre 1992].

L'équation 2.32 présente le modèle qui est basé sur les résultats de 336 essais. Ce modèle inclus le « mode factor » MF décrit par l'équation 2.20 dans son expression. Le facteur multiplicatif pour estimer le nombre de chargement sur la route est inconnu pour le moment.

$$\begin{aligned} \text{Log } N = & 34,5326 - 6,1447 \log \varepsilon - 3,3950 \log E \\ & + 0,3864 (\log V_b) \text{ MF} - 0,0788 V_a \end{aligned} \quad (2.32)$$

ε = déformation

N = nombre de cycles à la rupture

E = rigidité de l'enrobé (MPa)

V_b = teneur volumique en bitume (%)

V_a = teneur volumique en vides (%)

MF = 1 pour déformation constante ou -1 pour contrainte constante

Le programme de recherche américain SHRP a également développé en 1994 son modèle pour prédire la résistance à la fatigue des enrobés présenté à l'équation 2.33 [Tayebali & al 1994]. Ce modèle est basé sur 196 essais effectués à contrainte ou à déformation contrôlée sur 44 enrobés différents avec l'essai de flexion de poutre aux tiers points. La rigidité de l'enrobé est remplacée par son module de perte E'' , tel que décrit à la section 2.6.1, afin de tenir compte à la fois de l'effet de la rigidité et de l'angle de phase.

$$N = 2,738 \times 10^5 e^{0,077 \text{ VFB}} \varepsilon^{-3,624} E''^{-2,720} \quad (2.33)$$

ε = déformation initiale

N = nombre de cycles à la rupture

E'' = rigidité de perte initiale (psi) [$E \sin \phi$]

VFB = vides comblés par le bitume (%)

Deacon & al proposent de multiplier par 14 le nombre de cycles estimé par le modèle SHRP pour tenir compte de la différence entre le laboratoire et le terrain. Un facteur de 14 représente une fissuration admissible de 45% dans les traces de roues sur la route. Si l'on désire limiter la fissuration d'avantage, un facteur de 10 limite la fissuration à 10% dans les traces de roues [Deacon & al 1994]. Harvey & al affirment que contrairement à la caractérisation en laboratoire, la vitesse de propagation des fissures sur la route est influencée par le niveau de déformation. Un faible niveau de déformation sur la route augmente le nombre de chargement pour initier la fissuration et diminue la vitesse propagation de la fissure. Ils ont développé une équation pour le facteur multiplicatif SF « Shift Factor » en fonction de la déformation ε , comme le montre l'équation 2.34 [Harvey & al 1997].

$$SF = 3,1833 \times 10^{-5} \varepsilon^{-1,3759} \quad (2.34)$$

2.10.3 Bitume

Le programme de recherche SHRP a développé un critère mesuré sur le bitume pour juger de la résistance à la fatigue d'un enrobé. Ce critère est le module de perte en cisaillement du bitume G'' tel que $G'' = G \sin \delta$ où G est le module en cisaillement et δ l'angle de phase. Ce module est mesuré à partir d'un essai de cisaillement dynamique qui emploie un rhéomètre à cisaillement dynamique DSR « Dynamic Shear Rheometer » pour la caractérisation. SHRP suppose que ce paramètre est relié à la dissipation de l'énergie dans l'enrobé au cours d'un essai de fatigue [Chappat & Ferraro Maia 1997] et que l'énergie dissipée est liée à l'initiation des fissures dans l'enrobé. Ils supposent qu'une énergie dissipée élevée correspond à une faible résistance à la fatigue [Claxton & al 1996]. Ainsi, SHRP limite la valeur du module de perte G'' à 5 MPa pour un bitume vieilli à long terme selon le protocole établi par le programme SHRP.

Plusieurs auteurs critiquent ce paramètre associé à la résistance à la fatigue [Chappat & Ferraro Maia 1997]. Reese a observé que le module de perte G'' ne corrèle pas bien avec les résultats obtenus sur le terrain [Reese & Goodrich 1993, Reese 1994]. Il semble que ce critère permet l'utilisation de bitumes qui présentent de piètres performances en fatigue alors qu'il exclut des bitumes qui sont considérés parmi les meilleurs [Deacon & al 1997]. Deacon & al,

recommandent l'élimination de ce paramètre de la liste des critères SHRP à respecter lors de la caractérisation des bitumes. Claxton & al concluent que la rhéologie du bitume ne peut expliquer à elle seule, un mécanisme de dégradation aussi complexe que la fatigue [Claxton & al 1996].

3. PLAN DU PROJET ET METHODOLOGIE

Ce projet sur la caractérisation en laboratoire de la rigidité et de la résistance à la fatigue des enrobés est le premier du genre effectué au Québec. L'objectif principal de ce projet est d'établir une procédure pour la caractérisation des enrobés à l'aide de l'essai cyclique de flexion de poutre avec chargement appliqué aux tiers points. Par la même occasion, la caractérisation de différents types d'enrobés est prévue dont l'étude d'enrobés associés à un site expérimental. Dans un premier temps, le plan de la démarche réalisée dans le cadre de ce projet est exposé. Par la suite, il est question de la méthodologie concernant l'équipement employé et l'analyse proposée.

3.1 Plan du projet

Ce projet de recherche est constitué de quatre volets. Dans un premier temps, l'étude de la fabrication des poutres nécessaires à l'essai est abordée. Par la suite, la caractérisation de la rigidité et de la résistance à la fatigue de deux enrobés de base posés au Québec est proposée. En troisième analyse, la caractérisation d'enrobés associés à un site expérimental de suivi de la performance est présentée. Et finalement, une discussion sur les modèles généraux obtenus est prévue incluant une étude comparative avec les modèles que l'on retrouve dans la littérature.

3.1.1 Fabrication des poutres

La première étape de ce projet consiste à établir une méthode efficace et rigoureuse pour la fabrication en laboratoire des poutres nécessaires pour effectuer les essais de flexion. Il est primordial que les échantillons fabriqués en laboratoire représentent le plus fidèlement possible les conditions de fabrication sur la route de manière à caractériser un matériau qui correspond à la réalité. Par ailleurs, pour l'élaboration des modèles, il est également important que les échantillons présentent une faible variabilité entre eux en ce qui concerne leur

constitution. Ainsi, une étude a été effectuée pour élaborer une méthode de fabrication des poutres qui satisfait à ces exigences.

3.1.2 Rigidité et résistance à la fatigue des enrobés de base ESG-14 et GB-20

Pour établir une procédure d'essai avec un appareil, il est essentiel d'effectuer plusieurs essais afin de maîtriser tous les aspects de l'outil avec lequel on est amené à travailler. Cette étude propose la caractérisation de deux types d'enrobés habituellement posés en couche de base au Québec, soit les enrobés ESG-14 et GB-20. Ces enrobés ont été sélectionnés puisqu'ils risquent d'être les plus sollicités en fatigue dû à leur position dans la chaussée. Leur comportement a été étudié pour quatre à cinq températures sélectionnées parmi les plus récurantes et les plus aggravantes en ce qui concerne la dégradation par fatigue. Cette étude a permis d'établir les bases des méthodes d'essais et d'analyses, en plus de caractériser l'influence de la température sur le comportement de l'enrobé. La température est considérée comme l'un des paramètres les plus influents sur l'évolution de la dégradation des chaussées au Québec.

3.1.3 Rigidité et résistance à la fatigue des enrobés MB-16 de l'autoroute 10.

Le site expérimental de suivi de performance visé par cette étude a été construit en 1992 à l'extrémité est de l'autoroute 10, en banlieue de la ville de Sherbrooke. L'évolution de la dégradation du site a été l'objet d'un suivi depuis sa construction, ce qui en fait un site privilégié pour les travaux d'analyse. De plus, une quantité importante de matériaux vierges a été prélevée lors de la construction de manière à reconstituer les enrobés en laboratoire, ce qui permet de fabriquer les poutres nécessaires à l'essai avec les matériaux originaux. Le site est divisé en quatre sections construites de manière identique à l'exception du type de bitume employé pour la formulation de l'enrobé de type MB-16. Cette étude a permis de mettre en pratique les méthodes d'essais et d'analyses recommandées à la suite de la caractérisation des enrobés de base. De plus, le potentiel de l'essai de flexion aux tiers points pour classer différents enrobés en fonction de leur performance à la dégradation par fatigue observée sur la route a pu être évalué, ainsi que l'influence du type de bitume sur le comportement de l'enrobé.

3.1.4 Modèles généraux et comparaison avec les modèles de la littérature

Finalement, suite aux recommandations sur la caractérisation des enrobés de base ESG-14 et GB-20 ainsi que les enrobés MB-16, il a été possible de développer des modèles généraux pour la prédiction de la rigidité, de l'angle de phase et de la résistance à la fatigue des enrobés. Ces modèles sont discutés et comparés avec certains modèles de la littérature afin de juger de leur potentiel pour la conception des chaussées.

3.2 Méthodologie

Avant d'entreprendre l'analyse des études mentionnées, il est pertinent de regarder certains aspects qui permettront d'alléger les explications. En premier lieu, deux appareils sont présentés puisqu'il s'agit d'outils spécialisés dont les seuls exemplaires au Québec se trouvent au Laboratoire des Chaussées du ministère des Transports du Québec, soit le compacteur de plaques et l'essai de flexion de poutre aux tiers points. Par la suite, on présente deux définitions alternatives à la norme de l'essai de fatigue que l'on désire éprouver dans le cadre de ce projet. Il s'agit de définitions pour décrire la rigidité initiale de l'enrobé ainsi que sa rupture lors de l'essai de fatigue.

3.2.1 Compacteur de plaques

Les poutres destinées à l'essai de flexion aux tiers points sont fabriquées à l'aide d'un compacteur de plaques de type LCPC « Laboratoire Central des Ponts et Chaussées ». Il s'agit d'une méthode qui s'apparente aux méthodes de compactage à rouleau mais qui donne une meilleure précision [University of California & al 1994]. La méthode est décrite par la norme française NF P 98-250-2 « Préparation des mélanges hydrocarbonés *Partie 2: Compactage des plaques* ».

L'appareillage consiste en un pneu qui effectue des passages selon un plan de compactage normalisé pour compacter une masse d'enrobé déterminée dans un moule rectangulaire en

acier. La roue circule longitudinalement au moule avec une vitesse et une pression constante. La surface de l'enrobé compacté est maintenue égale au bord supérieur du moule à l'aide du fond réglable du moule. Ce dernier permet de compenser la perte de hauteur de l'enrobé associée à sa réduction de volume lors de son compactage. La figure 3.1 montre une photo de l'appareillage.

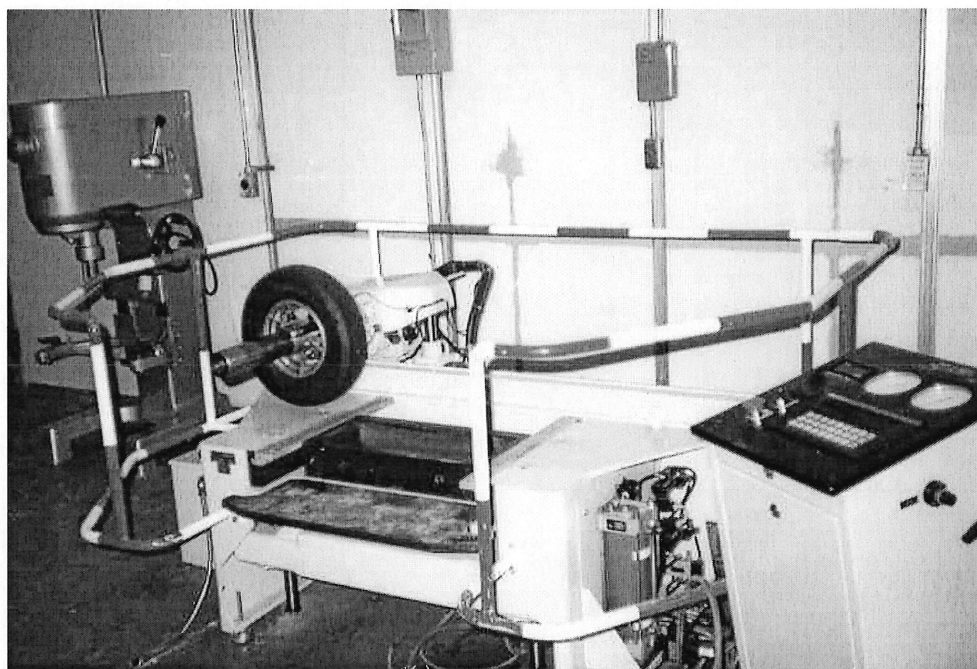


Figure 3.1 – Photo du compacteur de plaques de type LCPC.

Différentes dimensions de moules sont disponibles pour le compactage tel que présenté au tableau 3.1. La masse à incorporer dans le moule est fonction de la densité maximale de l'enrobé, du volume du moule et de la compacité prévue selon l'équation 3.1. La densité maximale de l'enrobé est déterminée selon la procédure de la norme LC 26-045 « Détermination de la densité maximale », elle représente la densité de l'enrobé s'il n'existe aucun vide. Il existe deux modes de compactages qui sont définis en fonction de l'énergie, soit le compactage à faible niveau d'énergie et le compactage à fort niveau d'énergie. Le principe est le même, seul le nombre de passages de roue diffère. Cette approche en fonction du niveau d'énergie est un atout puisqu'elle permet de comparer des enrobés sans tenir compte de leur compacité qui est directement influencée par la teneur en bitume [Moutier 1990].

$$\text{Masse} = \text{volume du moule} \times D_{\text{max}} \times \% \text{ de compacité} \quad (3.1)$$

Tableau 3.1 - Dimensions des moules disponibles pour le compactage.

Surface du moule	Nombre de roues	Épaisseur du moule
500 x 180 mm	roue simple	50 mm
		100 mm
600 x 400 mm	Roues jumelées	150 mm
		200 mm

En ce qui concerne les températures employées pour la préparation et le compactage de l'enrobé, les spécifications établies par le programme de recherche américain SHRP « Strategic Highway Research Program » sont employées au lieu des températures suggérées par le LCPC. Le programme SHRP a déterminé deux températures pour le travail en laboratoire, soit la température de malaxage et la température de compactage. Ces deux températures sont définies par la viscosité cinématique du bitume. La température de malaxage correspond à la température pour laquelle le bitume a une viscosité de 170 mm²/s et la température de compactage correspond à une viscosité de 280 mm²/s. La période de vieillissement de 4 heures à 135°C exigée par la norme a été omise pour des raisons strictement pratiques.

3.2.2 Essai de flexion de poutre aux tiers points

L'essai de flexion aux tiers points est effectué à l'aide d'un appareil CS 7800 acquis en 1995 qui a été fabriqué par James Cox & Sons à Colfax en Californie et dont on retrouve une photo à la figure 3.2. Il s'agit d'un appareil entièrement automatisé à chargement axial simple monté sur un système hydraulique en circuit fermé. Cet appareil est conçu pour effectuer différents types d'essai sur des échantillons de sols ou d'enrobés pour une grande plage de fréquence et de température. La fréquence peut varier de 0 à 60 Hz et la température de -20 à 70 °C. La cellule de charge est limitée à une force de 100 kN. Avec l'appareil on peut acheter des modules d'essais qui se fixent à la cellule de charge qui se trouve à l'intérieur de l'enceinte à température contrôlée. Il s'agit de modules vendus séparément qui permettent l'exécution d'essais spécifiques tels que des essais de tension indirecte ou de cisaillement sur des

briques ou encore des essais de tension-compression sur des cylindres. Un logiciel est fourni avec les modules pour faire la gestion de l'essai à l'aide d'un ordinateur.

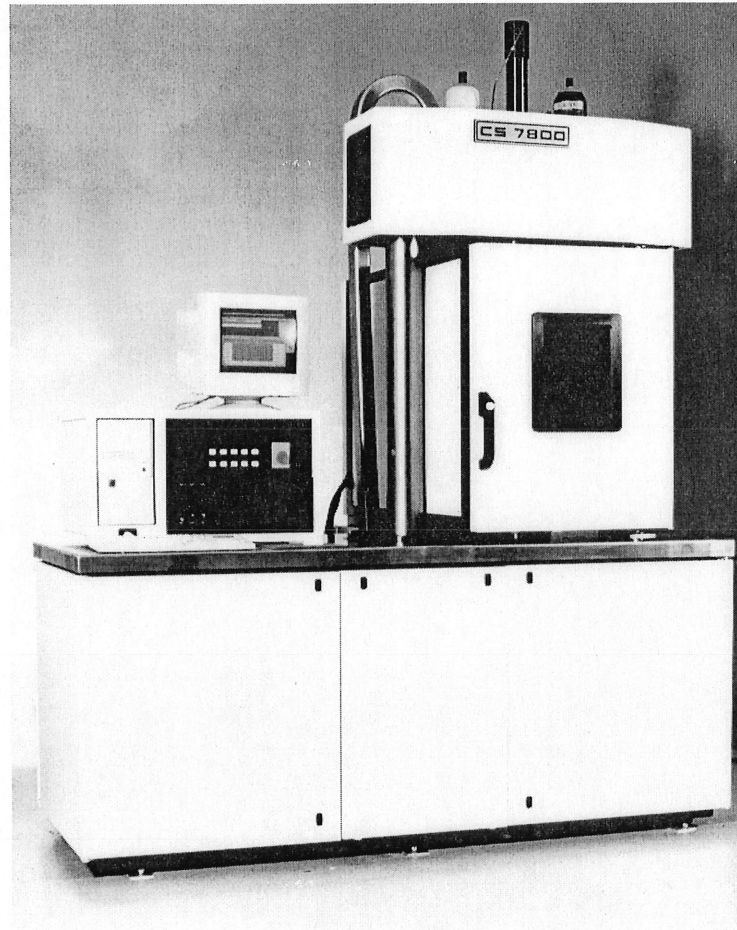


Figure 3.2 – Photo de l'appareil CS 7800.

L'appareil CS 7800 a été acheté avec le module pour effectuer des essais cycliques de flexion sur des poutres rectangulaires appuyées aux extrémités et chargées aux tiers points. Le module d'essai est constitué de quatre pinces, comme le montre la photo de la figure 3.3, à l'intérieur desquelles on fixe une poutre d'enrobé, tel qu'illustré à la figure 2.10 de la section 2.5.2. La poutre a une longueur de 380 mm (15 po), une largeur de 64 mm (2,5 po) et une hauteur de 51 mm (2 po). Les pinces sont libres de pivoter dans tous les sens ce qui les empêchent d'induire un moment ou de la torsion dans la poutre. La poutre est ramenée à sa position initiale après chaque cycle de chargement. Un logiciel est fourni avec le module pour faire la gestion et l'analyse de

l'essai. Il suffit de fixer la poutre dans le module et de sélectionner une routine préalablement programmée par l'utilisateur afin d'indiquer au système quelle forme et quel niveau de sollicitation il doit appliquer. On peut également programmer l'enregistrement des données ainsi que leurs traitements. Par la suite, l'essai s'effectue automatiquement et l'opérateur arrête l'essai lorsqu'il est terminé s'il n'a pas indiqué au logiciel le moment où il voulait l'arrêter. Une procédure pour l'utilisation du logiciel et de l'appareil est proposée en annexe I.

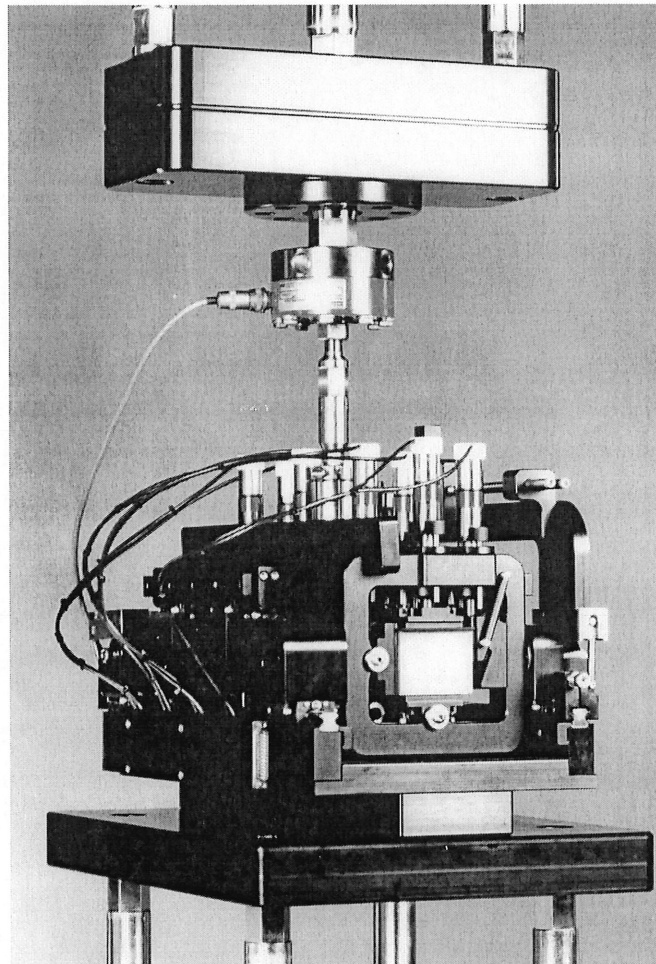


Figure 3.3 – Module d'essai de flexion de poutres aux tiers points.

L'essai de flexion de poutre aux tiers points se distingue par sa configuration qui permet une distribution uniforme de la force et du moment fléchissant sur la section centrale de la poutre selon les diagrammes présentés à la figure 3.4. Ainsi, la fissuration peut s'initier à partir de n'importe quel point de faiblesse de la fibre inférieure entre les mâchoires de chargement [Huang

1993]. Basé sur la théorie de l'élasticité, on peut calculer la contrainte et la déformation en tension à la fibre inférieure de la poutre selon l'expression des équations 3.2 et 3.3. La rigidité est déterminée selon le rapport entre la contrainte et la déformation selon l'équation 3.4. Les paramètres employés par les équations sont définis à la figure 3.4.

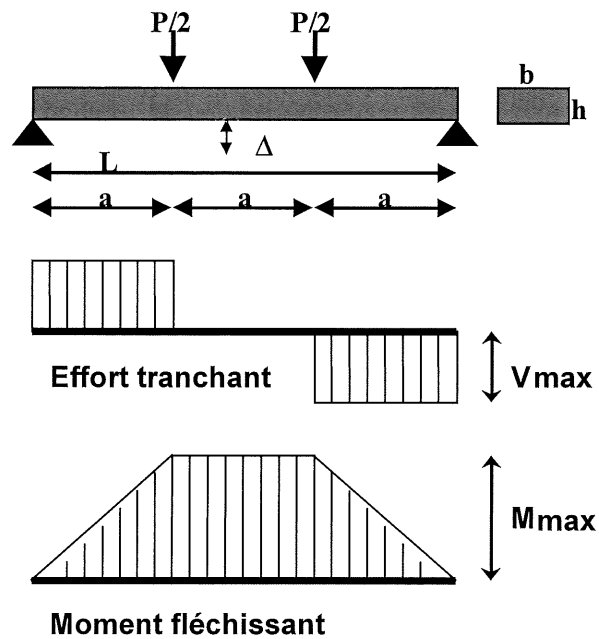


Figure 3.4 – Paramètres mesurés lors de l'essai de flexion de poutre aux tiers points et distribution de l'effort de cisaillement et du moment fléchissant sur la poutre.

$$\sigma = 3Pa / bh^2 \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = 12h\Delta / (3L^2 - 4a^2) \quad (3.3)$$

$$E = \sigma / \varepsilon = Pa (3L^2 - 4a^2) / 4bh^3\Delta \quad (3.4)$$

σ = contrainte maximale en tension (Pa)

ε = déformation maximale en tension (m/m)

E = rigidité en flexion (Pa)

P = force appliquée sur la poutre (N)

Δ = déflexion appliquée au centre de la poutre (m)

b = largeur de la poutre (m), [environ 0,063 m]

h = hauteur de la poutre (m), [environ 0,050 m]

a = espace entre les pinces (m), [environ 0,119 m]

L = espace entre les pinces extérieures (m), [environ 0,357 m]

Dans le cas d'un essai de flexion aux tiers points, la distance entre les points de chargement et les appuis aux extrémités (a) est égale aux tiers de la longueur totale (L), ce qui permet de simplifier l'expression de la rigidité selon l'équation 3.5.

$$E = 23PL^3 / 108bh^3\Delta \quad (3.5)$$

Irwin et Gallaway suggèrent de tenir compte de la déformation en cisaillement par le biais d'un facteur de correction ajouté à l'expression du module dynamique selon la forme présentée par l'équation 3.6 [Irwin & Gallaway 1974]. Étant donné la configuration de l'essai, les auteurs du programme SHRP considèrent que le rapport h^2/L^2 est suffisamment faible pour être négligé [Tayebali & al 1994].

$$E = [23PL^3 / 108bh^3\Delta] [1 + 216h^2 (1 + \nu) / 115L^2] \quad (3.6)$$

3.2.3 Définition alternative de la rupture par fatigue

Le critère de rupture usuel pour les essais de fatigue est la perte de la moitié de la rigidité initiale de l'enrobé, tel que spécifié par la norme AASHTO TP8-94 « Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending ». Ce critère de rupture semble empirique puisqu'il ne tient pas compte de l'influence de la rhéologie de l'enrobé sur sa capacité à emmagasiner de l'endommagement par fatigue. Ainsi, il a semblé pertinent d'analyser le fondement de ce critère de rupture avant de débiter la caractérisation des enrobés.

Lors d'essais de fatigue préliminaires, l'évolution de la rigidité, de l'angle de phase et de l'énergie dissipée cumulée ont été observés jusqu'à la rupture réelle de la poutre, soit une perte

de rigidité presque totale. Il a été observé que l'augmentation de la valeur de l'angle de phase lors de l'essai de fatigue se termine par une chute rapide de sa valeur suite à un certain nombre de cycles de chargement, tel que constaté par Reese et présenté à la figure 3.5 [Reese 1997]. De même, il a été observé par Hopman & al, Pronk ainsi que Little & al que l'évolution de l'énergie dissipée se fait en deux temps selon deux relations presque linéaires, comme le montre la figure 3.6 [Hopman & al 1989, Pronk 1997, Little & al 1997]. L'observation la plus marquante au niveau de l'évolution de ces deux paramètres est que la chute de l'angle de phase se produit suite au même nombre de cycles que le point de transition entre les deux relations linéaires pour décrire l'évolution de l'énergie dissipée cumulée. Ce constat semble indiquer un changement d'état important dans la structure de l'enrobé à ce moment. Basé sur les discussions de Hopman & al [Hopman & al 1989] et de Reese [Reese 1997] rapportées à la section 2.7.3, ces points sont associés à la rupture par fatigue de l'enrobé.

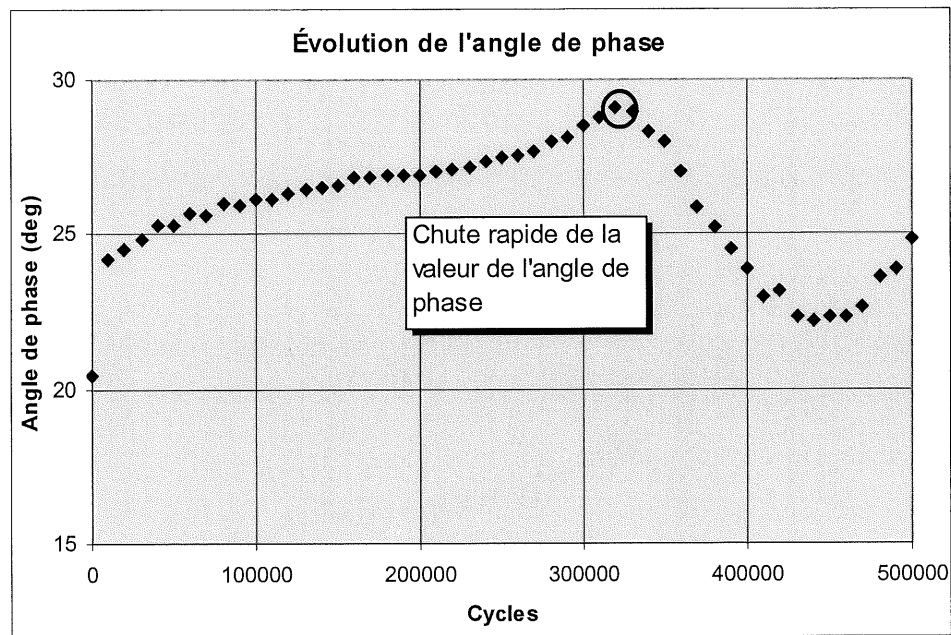


Figure 3.5 – Évolution de l'angle de phase lors d'un essai de fatigue.

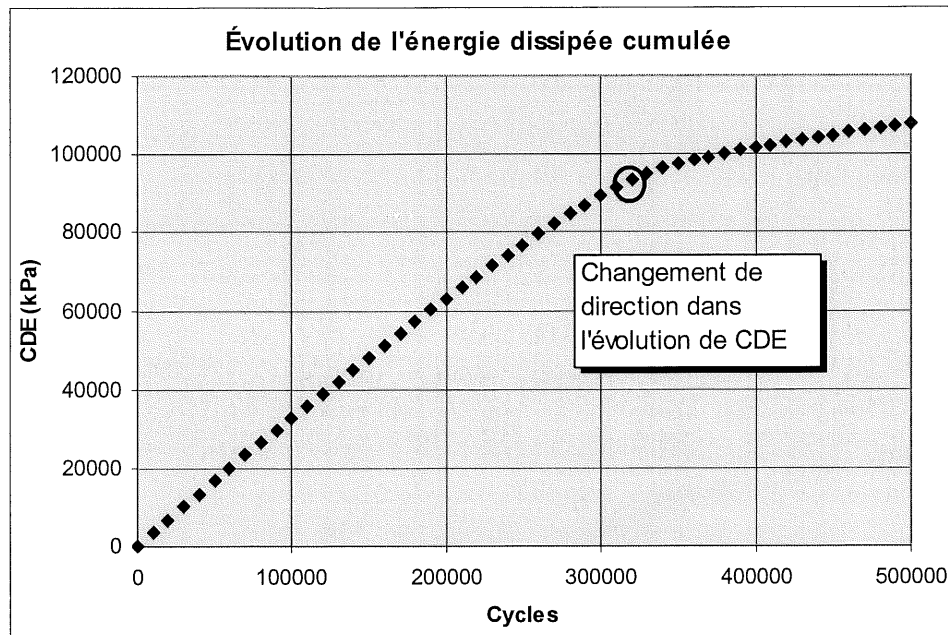


Figure 3.6 – Évolution de l'énergie dissipée cumulée lors d'un essai de fatigue.

Il est également possible de suivre l'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue. Ce paramètre est particulièrement intéressant puisque la norme est basée sur sa valeur pour définir la rupture. On sait que son évolution se fait en trois phases distinctes, soit la période d'échauffement, d'endommagement par fatigue et d'endommagement accéléré, tel que discuté à la section 2.7.3. Lors de la période d'endommagement accéléré à la fin de l'essai (phase 3), on observe un point d'inflexion dans la diminution de la rigidité, tel qu'on peut le constater à la figure 3.7. Ce point se produit suite au même nombre de cycles que la chute de l'angle de phase et le changement de direction de l'énergie dissipée ce qui semble l'associer à la rupture de l'enrobé. Ce constat semble en accord avec les observations effectuées par Di Benedetto & al et De la Roche & Marsac puisque la rupture semble se produire lors du troisième stade de l'endommagement par fatigue [Di Benedetto & al 1996, De la Roche & Marsac 1996].

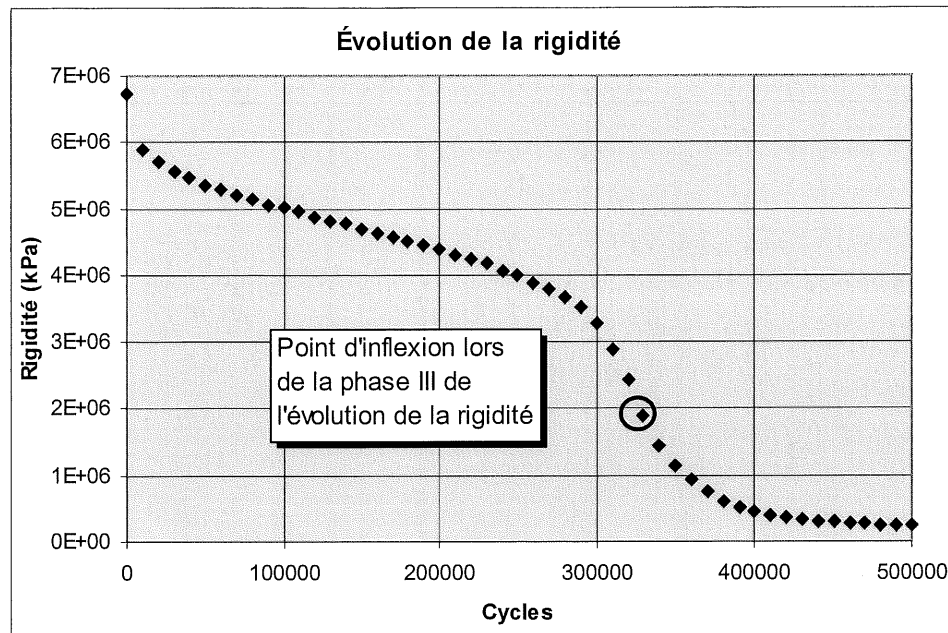


Figure 3.7 – Évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue.

En pratique, l'identification de ces points associés à la rupture est relativement simple. La relation entre deux points sur une courbe est caractérisée par une pente. Un changement de forme dans la courbe peut donc être caractérisé par un changement de pente. Il suffit de calculer la pente entre chaque point (dérivée) et de mettre ces valeurs sur un graphique pour décrire l'évolution d'une courbe. L'analyse de l'évolution de la rigidité à la figure 3.8 montre que la pente entre chaque point exprimée en fonction du nombre de cycles décrit un pic négatif important au niveau de la section d'endommagement accéléré. Le point maximal correspond à la pente la plus élevée après la section d'endommagement par fatigue (phase 2). L'analyse de l'évolution de l'angle de phase à la figure 3.9 est encore plus simple puisque la pente devient négative lorsque l'angle de phase se met à diminuer. En ce qui concerne l'évolution de la pente de l'énergie dissipée à la figure 3.10, sa forme rappelle l'évolution de la rigidité. Si on calcule une seconde fois la pente entre chaque point (dérivée seconde), on obtient un pic négatif qui correspond au passage d'une expression linéaire à une autre.

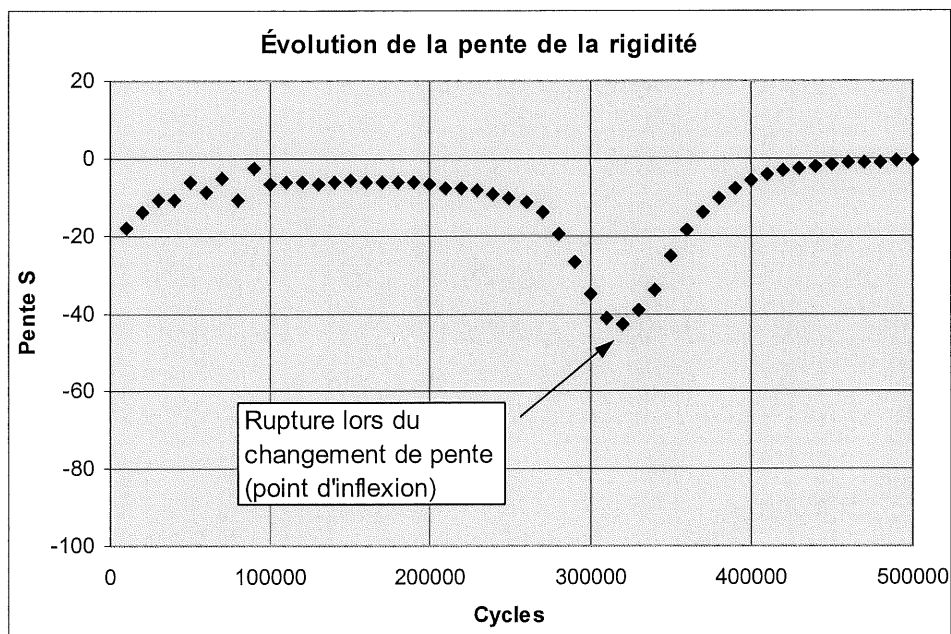
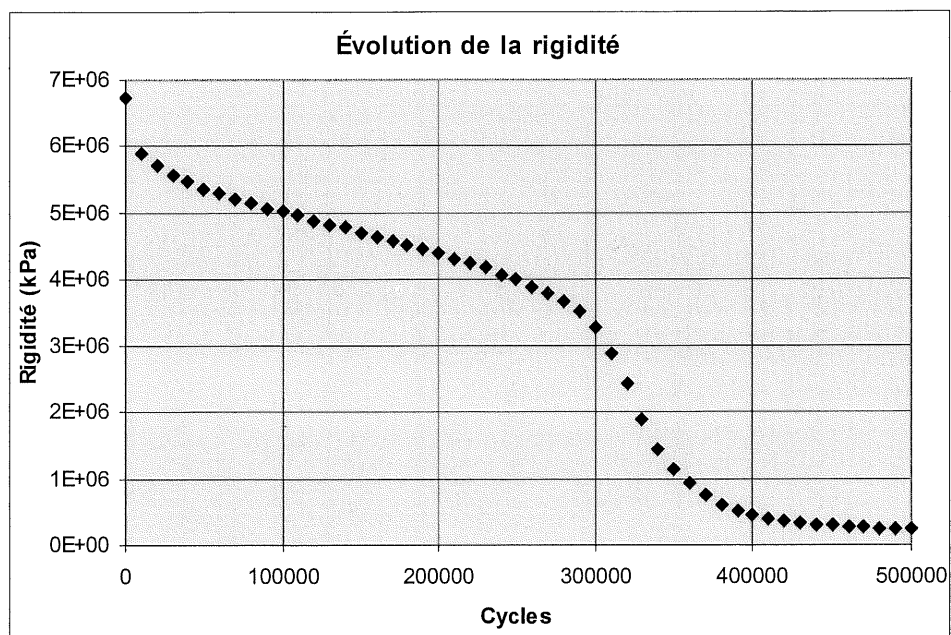


Figure 3.8 – Détermination de la rupture basée sur l'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue.

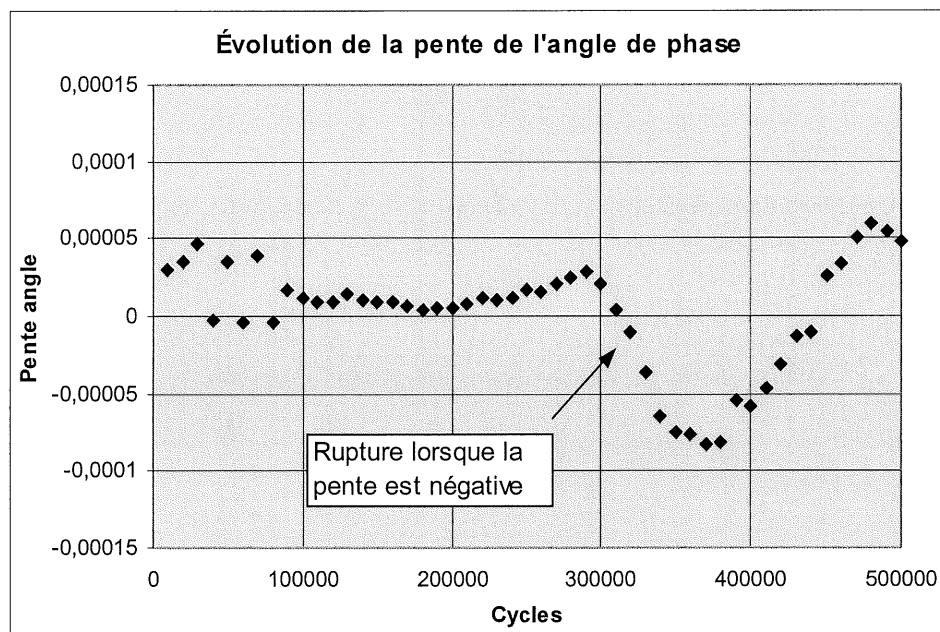
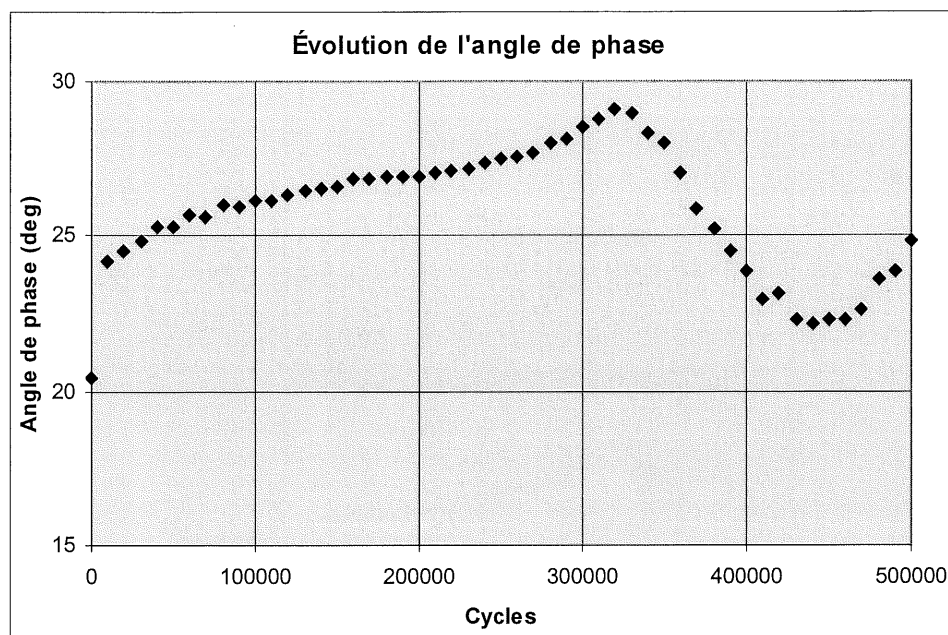


Figure 3.9 – Détermination de la rupture basée sur l'évolution de l'angle de phase lors de l'essai de fatigue.

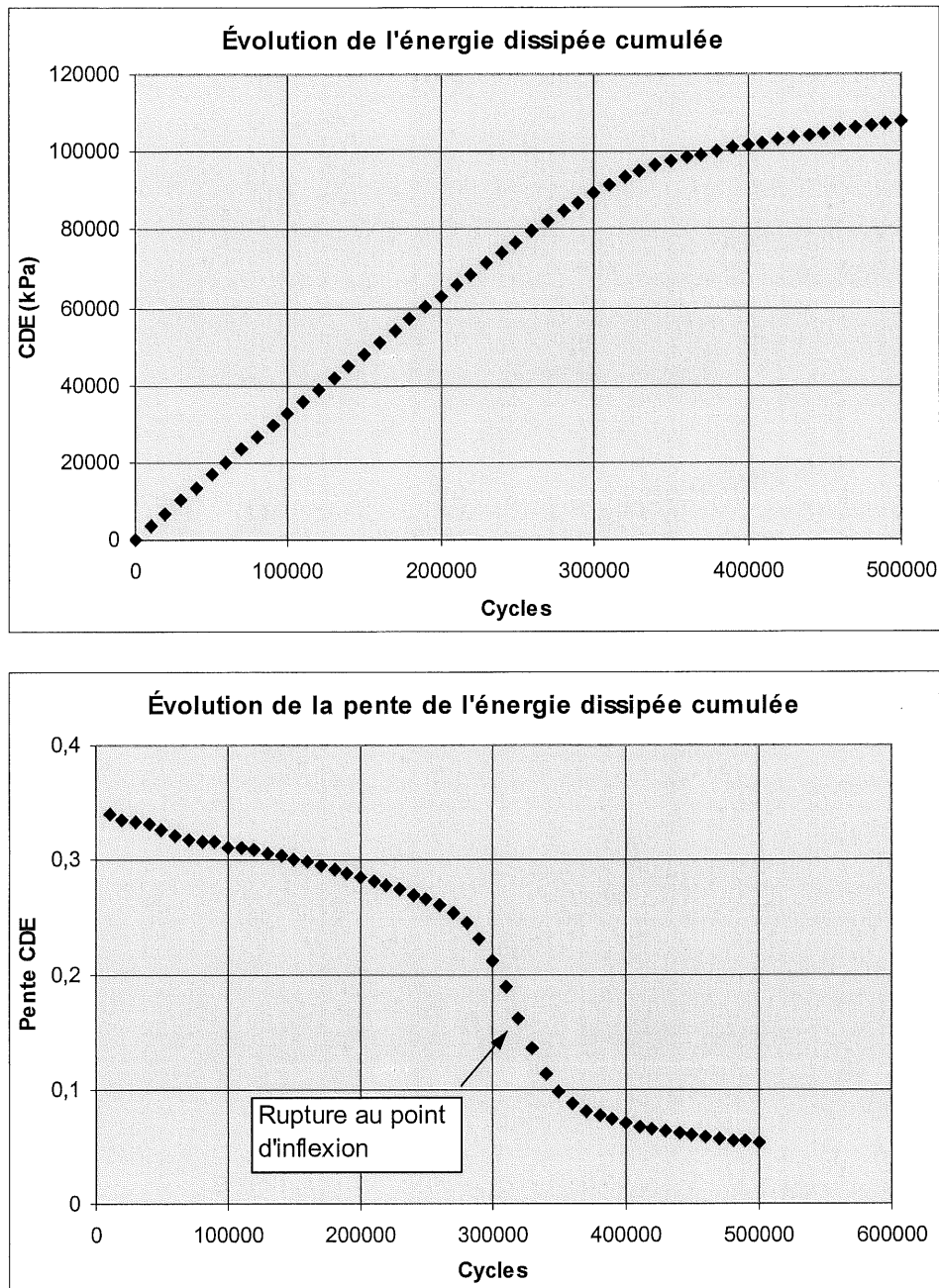


Figure 3.10 – Détermination de la rupture basée sur l'évolution de l'énergie dissipée cumulée lors de l'essai de fatigue.

Le nombre de cycles donné par chacun de ces points concorde habituellement parfaitement, bien qu'il existe quelques exceptions concernant l'angle de phase, car sa chute n'est pas toujours franche. Ainsi, on dispose de deux définitions de la rupture, soit une associée à la

perte de la moitié de la rigidité initiale que l'on notera « $N_{1/2}$ » et une associée au point d'inflexion de la courbe d'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue que l'on notera « N_r ».

3.2.4 Définition alternative de la rigidité initiale

La rigidité initiale est généralement mesurée suite à un nombre de cycles fixé par la norme d'essai. Elle n'est généralement pas mesurée suite au premier cycle de sollicitation puisque que l'on doit laisser le temps à l'enrobé de s'adapter à la sollicitation appliquée avant de mesurer sa rigidité [Baburamani & Potter 1996]. Encore une fois, cette approche semble empirique puisqu'il est probable que le temps nécessaire pour que l'enrobé s'adapte à un nouvel état de sollicitation soit influencé par ses propriétés thermique et rhéologique. Ainsi, il est possible que de fixer le nombre de cycles nécessaire pour mesurer la rigidité initiale de l'enrobé, ne permette pas de mesurer sa véritable rigidité initiale.

Dans le cadre de ce projet, la rigidité initiale a également été déterminée par une méthode alternative. La technique consiste à extrapoler jusqu'à l'origine la section linéaire de l'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue, comme l'illustre la figure 3.11. De cette façon on évite d'inclure la perte de rigidité associée à l'échauffement de l'enrobé au début de l'essai dans la caractérisation de la rigidité tel que discuté par Kon Kam Wa & al et Di Benedetto & al [Kon Kam Wa & al 1997, Di Benedetto & al 1996] à la section 2.7.3.

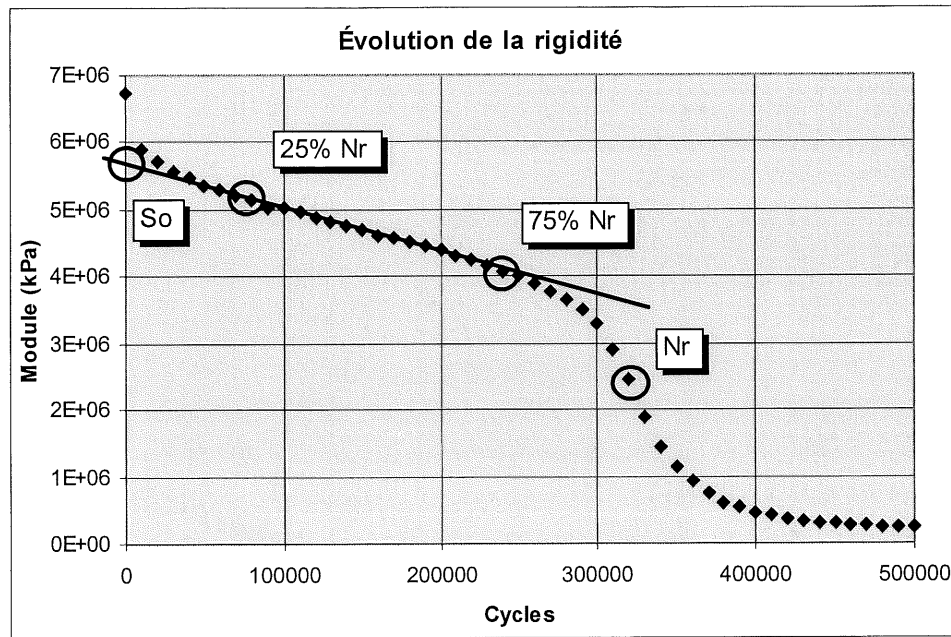


Figure 3.11 – Extrapolation de la rigidité initiale à partir de l'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue.

En pratique, on observe à la figure 3.11 que la section linéaire de l'évolution de la rigidité correspond à environ la moitié centrale du nombre de cycles total N_r . L'approche suggérée consiste à éliminer les données associées au premier quart du nombre de cycles total N_r , ce qui correspond à l'échauffement de l'enrobé, et les données du dernier quart du nombre de cycles total N_r , ce qui correspond à l'endommagement accéléré de l'enrobé. De cette manière, on conserve les valeurs de la section linéaire centrale pour extrapoler la rigidité initiale de l'enrobé. On dispose donc de deux définitions de la rigidité initiale, soit la rigidité mesurée suite à 50 cycles de chargement que l'on notera « S_{50} » et la rigidité extrapolée de la section linéaire de l'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue que l'on notera « S_o ».

4. ETUDE DE LA FABRICATION DES POUTRES

Une étude sur la préparation des poutres nécessaires pour effectuer l'essai de flexion aux tiers points a été effectuée. Elle a permis de développer une méthode de fabrication conforme aux exigences de la norme AASHTO PP3-94 « Standard practice for preparing hot mix asphalt specimens by means of the rolling wheel compactor ». Pour ce faire, le compacteur de plaque de type LCPC disponible au Laboratoire des Chaussées du MTQ a été employé.

4.1 Méthodologie

Les enrobés employés pour cette étude ont été échantillonnés dans une usine de production et ont été réchauffés en laboratoire pour le compactage suite à une période d'entreposage indéterminée. Cette approche est innacceptable pour la caractérisation de la rigidité et de la résistance à la fatigue mais consiste en un moyen rapide et efficace pour effectuer l'étude proposée. Les propriétés des différents enrobés ne sont connues qu'en partie mais ne sont pas nécessaires pour effectuer l'analyse proposée.

Trois types d'enrobés ont été utilisés, soit deux enrobés de granulométrie semi-grenue EB-10S et EB-20 formulés avec un bitume conventionnel ainsi qu'un enrobé de granulométrie grenue EG-10 formulé avec un bitume modifié. Les informations disponibles sur la formulation des enrobés et les bitumes employés sont fournies en annexe II. Basé sur l'expérience, on sait que le type de bitume influence peu la maniabilité de l'enrobé si les températures de malaxage et de compactage sont respectées. Ainsi aucune distinction n'est faite entre les bitumes conventionnels et le bitume modifié dans l'étude de la compacité. Par contre, la granulométrie a une influence majeure sur la maniabilité et la teneur en bitume de l'enrobé, ce qui explique les écarts de compacité obtenus.

Il existe deux dimensions de plaques disponibles. Les plaques de 500 x 180 mm qui sont régulièrement fabriquées au Laboratoire des Chaussées et les plaques de 600 x 400 mm qui ne

sont pratiquement jamais employées. Selon l'avis des utilisateurs du compacteur de plaques, il semble que la distribution de la compacité soit plus homogène pour les plaques de petit format. Pour ces raisons, des plaques de 500 x 180 mm seront employées pour l'étude. Compte tenu de la dimension des poutres qui présentent une section de 51 x 64 mm, une épaisseur de 100 mm a été sélectionnée pour les plaques au lieu de 50 mm. Pour chaque enrobé, une plaque a été préparée avec un niveau d'énergie de compactage faible. De plus, une plaque supplémentaire avec un niveau d'énergie de compactage élevé a été préparée pour l'enrobé EB-10S. Par la suite, trois carottes ont été découpées à l'intérieur de chaque plaque à raison d'une au centre et une située de chaque côté entre le centre et le bord de la plaque dans le sens longitudinal selon le plan de carottage de la figure 4.1. Le carottage a été effectué dans le sens de l'épaisseur.

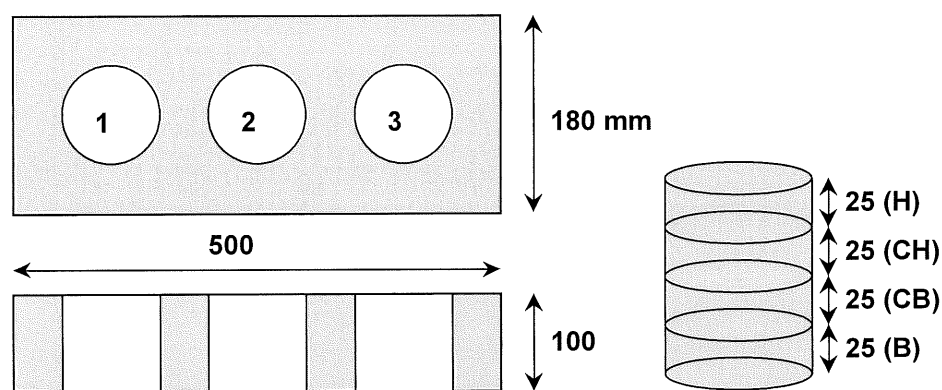


Figure 4.1 - Plan de carottage des plaques.

La densité de chaque carotte a été mesurée selon la méthode par déplacement d'eau LC 26-040 « Détermination de la densité brute et de la masse volumique des enrobés à chaud compactés ». Par la suite, la carotte a été découpée en trois sections de manière à mesurer la densité de la section centrale de 50 mm, comme le montre la figure 4.1. Finalement, certaines sections centrales ont été découpées en deux sections égales de 25 mm d'épaisseur de manière à obtenir la distribution de la compacité au centre de la plaque. Cette procédure a été effectuée sur les trois éprouvettes extraites de manière à obtenir la distribution de la compacité en fonction de l'épaisseur et de la longueur de la plaque.

4.2 Analyse des résultats

L'étude de la densité des carottes permet de caractériser la distribution de la compacité d'une plaque d'enrobé dans le sens longitudinal et dans le sens de l'épaisseur. Pour obtenir la compacité, il suffit de diviser la densité brute obtenue par déplacement d'eau par la densité maximale de l'enrobé. Les figures 4.2 à 4.4 montrent la distribution de la compacité obtenue par la méthode de compactage à faible niveau d'énergie pour les différents enrobés étudiés. La compacité globale des carottes est présentée ainsi que la compacité de leur différentes sections en fonction de leur position longitudinale et de l'épaisseur de la plaque. Les positions 1 et 3 correspondent aux carottes extraites entre le centre et l'extérieur de la plaque alors que la position 2 correspond à la carotte extraite au centre de la plaque. La masse d'enrobé employée pour la préparation des plaques correspondait à une compacité globale visée de la plaque de 88 %. Les feuilles de laboratoire pour la préparation des plaques ainsi que les densités mesurées sur les carottes sont fournies en annexe II.

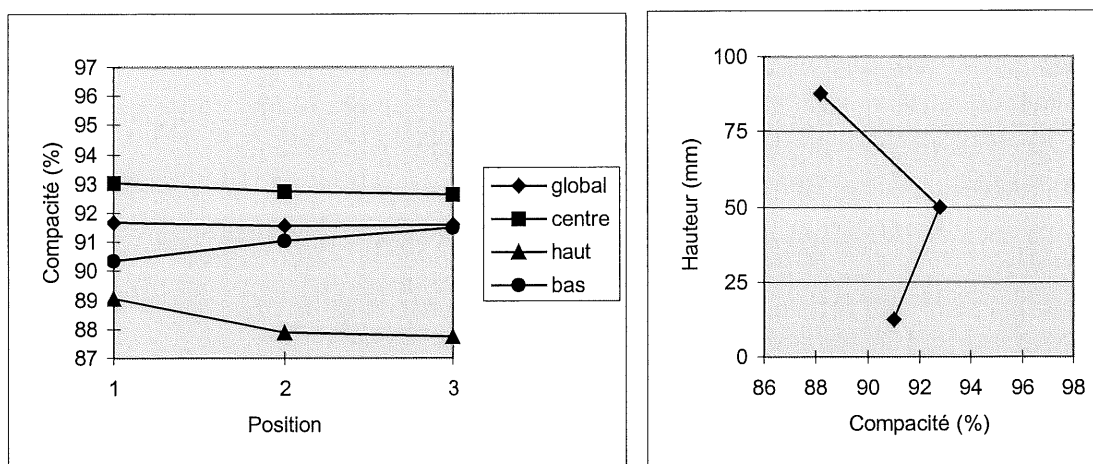


Figure 4.2 – Distribution de la compacité en longueur et hauteur dans une plaque d'enrobé EB-10S pour une faible énergie de compactage.

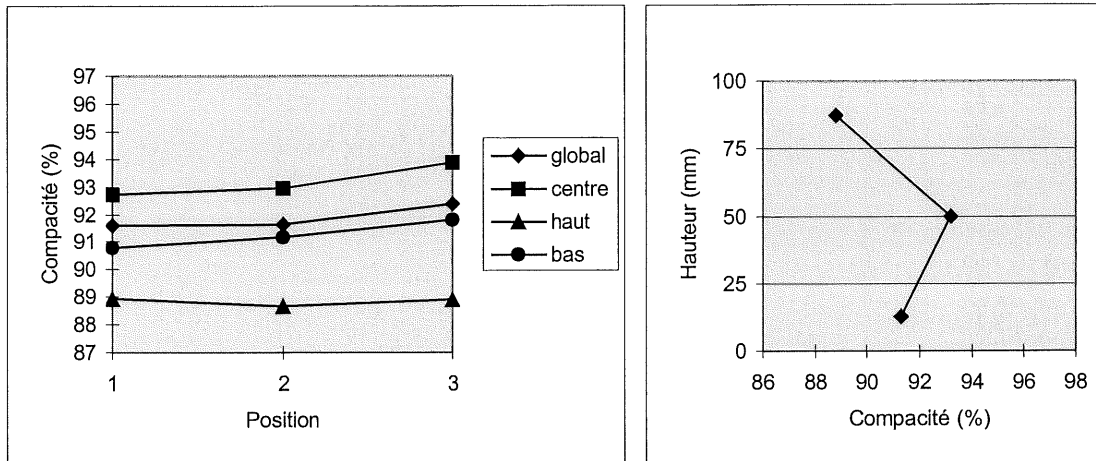


Figure 4.3 – Distribution de la compacité en longueur et hauteur dans une plaque d'enrobé EB-20 pour une faible énergie de compactage.

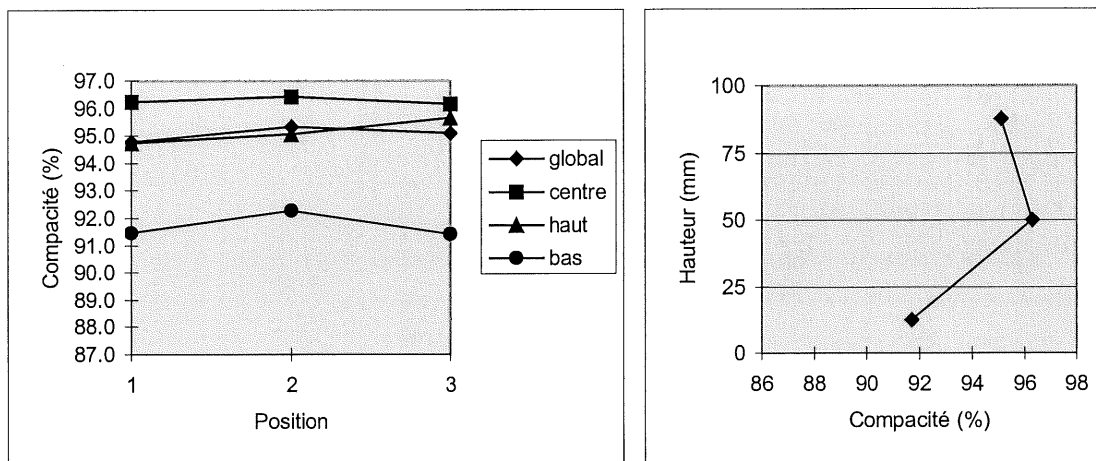


Figure 4.4 – Distribution de la compacité en longueur et hauteur dans une plaque d'enrobé EG-10 pour une faible énergie de compactage.

En premier lieu, on remarque que la compacité globale des plaques est inférieure à la compacité globale des carottes. Il existe une différence d'environ 3,4% dans le cas des enrobés semi-grenus et une différence de 5,1% dans le cas de l'enrobé grenu. De même, la compacité au centre des carottes est généralement environ 1,2% plus élevée que leur compacité globale. Ces constats semblent indiquer que la compacité augmente lorsque l'on se rapproche du centre de la plaque.

En ce qui concerne la distribution de la compacité en fonction de l'épaisseur, il est clair que le centre de la carotte est plus compacté. Par ailleurs, la compacité du bas de la carotte est environ 2,7% supérieure à la compacité du haut pour les enrobés semi-grenus alors que la compacité du bas pour l'enrobé grenu est 3,4% inférieure à la compacité du haut. La compacité des enrobés semi-grenus est donc plus élevée sur le dessous que sur le dessus de la plaque contrairement à l'enrobé grenu dont la compacité est plus élevée sur le dessus que le dessous. Ce constat semble clairement indiquer qu'il y a un écart de compacité entre le dessus et le dessous de la plaque, peu importe le type d'enrobé. En ce qui concerne la compacité dans le sens longitudinal, il semble qu'elle se distribue de manière uniforme.

Une plaque d'enrobé EB-10S a également été compactée avec un haut niveau d'énergie. La distribution de sa compacité est présentée à la figure 4.5 en comparatif avec sa compacité avec un faible niveau d'énergie. On observe que la compacité au centre de la plaque est d'environ 94,6% comparativement à 92,8% pour le faible niveau de compactage, ce qui donne un écart de 2,1%. Par ailleurs, mis à part l'écart de compacité, on observe que la distribution générale de la compacité dans la plaque est similaire pour les deux niveaux d'énergie employés.

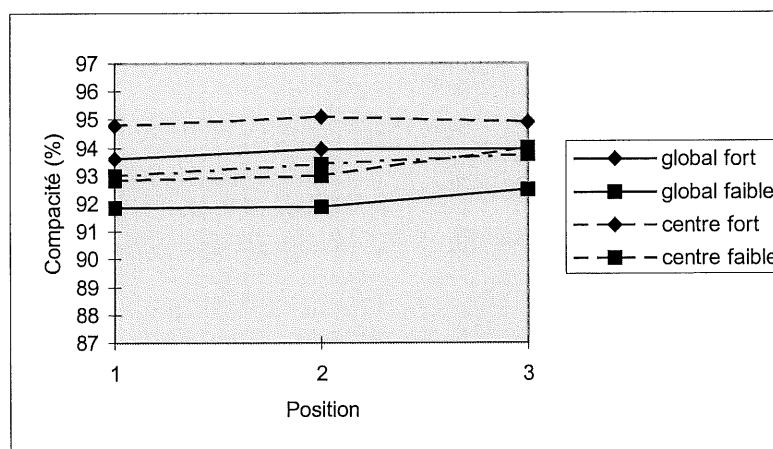


Figure 4.5 – Écart entre le mode de compactage à haut niveau et à bas niveau d'énergie pour l'enrobé EB-10S.

4.3 Discussion

Suite à l'analyse de la compacité de plaques constituées de différents types d'enrobés, il est possible de déterminer la procédure de fabrication des poutres nécessaires à l'essai de flexion aux tiers points. Premièrement, en ce qui concerne le niveau d'énergie employé pour le compactage et dans un deuxième temps, en ce qui concerne le sens des poutres découpées dans une plaque ainsi que la quantité.

4.3.1 *Énergie de compactage*

La compacité minimale exigée sur les routes du Québec est de 92% lors de la mise en place d'un enrobé. La compacité mesurée au centre des plaques compactées avec un faible niveau d'énergie est supérieure à cette limite. Ainsi, si l'on estime que les poutres doivent être découpées au centre de la plaque, le mode de compactage avec un haut niveau d'énergie est à proscrire puisqu'il augmente la compacité au centre de la plaque. Ainsi, il semble que le mode de compactage avec faible niveau d'énergie soit le mieux adapté pour la fabrication des poutres.

Bien entendu, en fixant le niveau d'énergie pour le compactage, on se retrouve avec une compacité différente pour chaque type d'enrobé en fonction de leur maniabilité. Ainsi, le point de comparaison entre les enrobés devient le niveau d'énergie constant appliqué pour leur mise en place et non leur compacité. Ce point de comparaison représente bien la structure de l'enrobé, si les exigences pour la compacité en chantier sont basées sur l'évaluation de sa maniabilité en laboratoire. Au Québec, on préconise plutôt une exigence minimale de 92% sur la compacité et les enrobés sont généralement compactés à ce pourcentage. Par ailleurs, il est difficile de préparer des poutres dans cet optique si l'on désire employer le compacteur de plaques. En effet, le mode de fonctionnement du compacteur est basé sur des niveaux d'énergie et non sur une compacité à atteindre. Ainsi, pour éviter toute variabilité dans la fabrication des poutres associée à une modification de la procédure de compactage, il est suggéré de respecter le mode de fonctionnement de l'appareillage. Il est également important

de considérer que le niveau d'énergie appliqué pour la mise en place constitue certainement le meilleur point de comparaison de différents enrobés.

4.3.2 Découpage des poutres

En ce qui concerne le découpage des poutres dans une plaque, on doit déterminer la quantité que l'on désire découper ainsi que le sens du découpage. Les poutres ont une hauteur de 51 mm, une largeur de 64 mm et une longueur de 381 mm. La plaque a une longueur de 500 mm, une largeur de 180 mm et une épaisseur de 100 mm. Bien entendu, la longueur de la poutre est découpée dans le sens de la longueur de la plaque, ce qui élimine 60 mm d'enrobé compacté à chaque extrémité de la plaque, zones où la compacité est moins élevée et moins uniforme.

Par ailleurs, on doit décider de la quantité de poutres à découper dans la plaque ainsi que de leur sens. La compacité se distribue de manière différente si on l'analyse selon l'épaisseur ou la largeur de la plaque. L'analyse de la distribution de la compacité a démontré qu'au centre de la plaque la compacité est plus élevée que sur le dessus et le dessous. De même, la distribution de la compacité n'est pas uniforme dans le sens de l'épaisseur puisqu'on note une différence significative entre la compacité du haut et du bas de la plaque. En ce qui concerne la compacité dans le sens de la largeur, basé sur les résultats de la distribution de la compacité dans le sens de l'épaisseur, il semble clair que la compacité est plus élevée au centre que sur les côtés de la plaque. Par ailleurs, il n'y a pas de raison de croire que la compacité est différente d'un côté ou de l'autre de la plaque, ce qui donne une uniformité de la distribution de la compacité que l'on ne retrouve pas dans le sens de l'épaisseur.

Ainsi, il semble que les poutres doivent être découpées dans le même sens que la plaque a été fabriquée, soit la hauteur dans le sens de l'épaisseur et la largeur dans le sens de la largeur selon le plan de découpage présenté à la figure 4.6. Elles doivent être sciées au nombre de deux, côte à côte au centre de la plaque, ce qui laisse un surplus de matériel de 25 mm au-dessus et au-dessous des poutres et de 26 mm sur les côtés. Cette approche permet de rejeter de manière acceptable les zones moins bien compactées de la plaque, ce qui permet de limiter l'influence de la variation de la compacité sur les résultats des essais. Il est également

important de noter le dessus des poutres, afin de toujours exposer la même face en tension lors de l'essai puisque la compacité du dessus de la poutre est différente de la compacité du dessous.

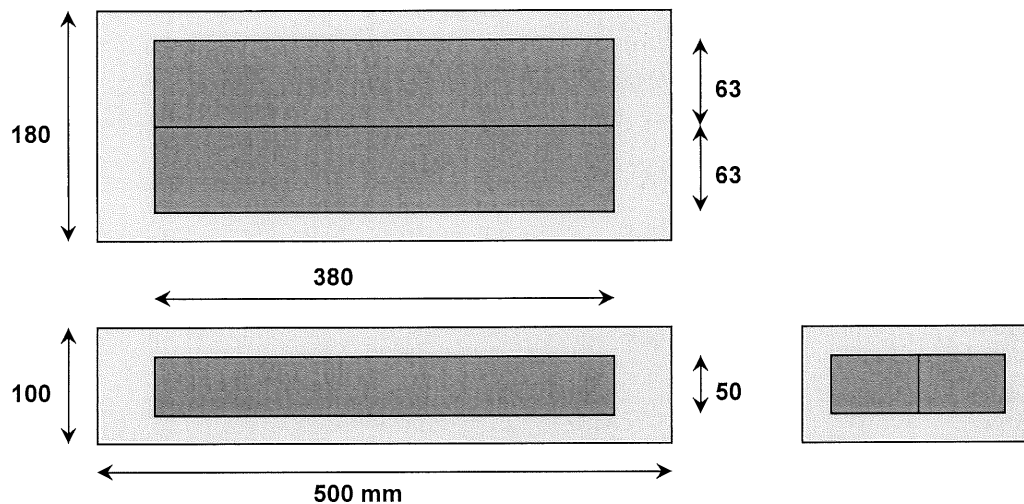


Figure 4.6 – Plan de découpage des poutres dans la plaque.

4.4 Recommandations

L'étude de la distribution de la compacité dans une plaque en fonction du type d'enrobé et du mode de compactage a permis d'établir la procédure de préparation des poutres. Le mode de compactage à faible niveau d'énergie est recommandé afin de ne pas surévaluer la rigidité et la résistance à la fatigue de ces enrobés. Il semble que la compacité obtenue en mode de compactage faible se rapproche plus de l'exigence minimale de 92% du MTQ. Il est sous-entendu que les températures de malaxage et de compactage sont respectées lors de la fabrication des plaques afin de tenir compte des caractéristiques rhéologiques des bitumes employés. En ce qui concerne les poutres, elles sont découpées au nombre de deux par plaques, côte à côte dans le même sens que la plaque a été fabriquée. La figure 4.6 montre le plan de découpage des poutres.

5. CARACTERISATION DES ENROBES DE BASE ESG-14 ET GB-20

Une caractérisation de la rigidité, de l'angle de phase et de la résistance à la fatigue d'enrobés ESG-14 et GB-20 a été réalisée en fonction de la température. Ces enrobés sont généralement posés en couche de base au Québec. Ils ont été retenus pour cette étude puisqu'il s'agit du type d'enrobé le plus sollicité en fatigue dû à sa position dans la structure de la chaussée. L'objectif principal de cette caractérisation est le développement des méthodes d'essais et d'analyses concernant l'essai de flexion de poutres aux tiers points. Par la même occasion, cette étude permet d'évaluer l'influence de la température, ainsi que du type d'enrobé et de bitume, sur la rigidité, l'angle de phase et la résistance à la fatigue des enrobés.

5.1 Description des enrobés

Quatre types d'enrobé ont été caractérisés dans le cadre de cette étude. Ils sont formés par la combinaison de deux granulométries, soit ESG-14 et GB-20, et de deux bitumes, soit conventionnel et modifié aux polymères. La formulation de ces enrobés a été effectuée conformément à la norme 4202 « Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des Chaussées ». Les détails concernant la formulation de ces enrobés sont fournis en annexe III.

5.1.1 Granulométrie

Les deux granulométries employées dans le cadre de cette étude sont présentées à la figure 5.1 pour l'enrobé ESG-14 et à la figure 5.2 pour l'enrobé GB-20. Elles représentent ce qui est généralement posé en couche de base au Québec. Il s'agit d'enrobés formulés avec des granulats de grosseur nominale maximale plus grande et une teneur en bitume plus faible que les enrobés employées pour les surfaces de roulement. Dans le cadre de cette étude, aucun essai n'a été effectué sur les granulats pour déterminer la rigidité du squelette granulaire.

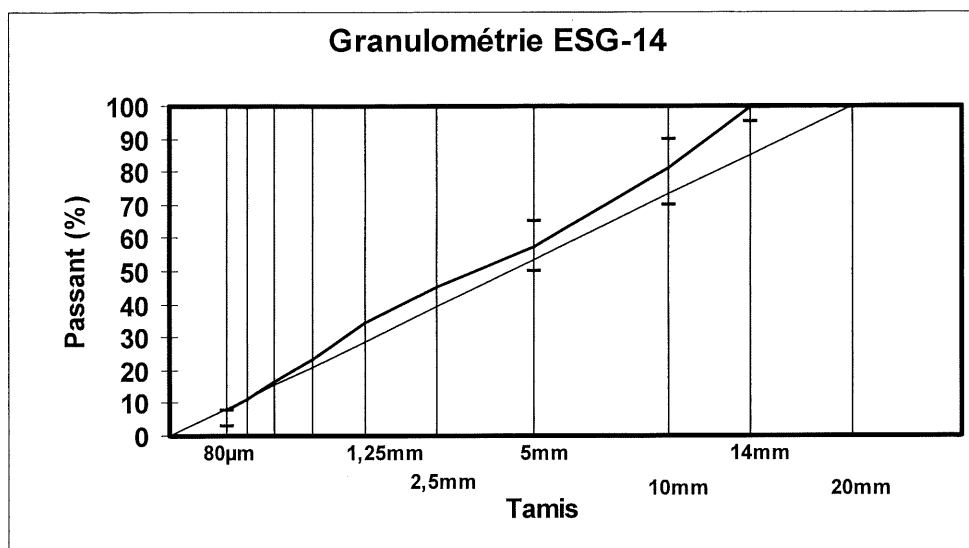


Figure 5.1 – Granulométrie des enrobés ESG-14.

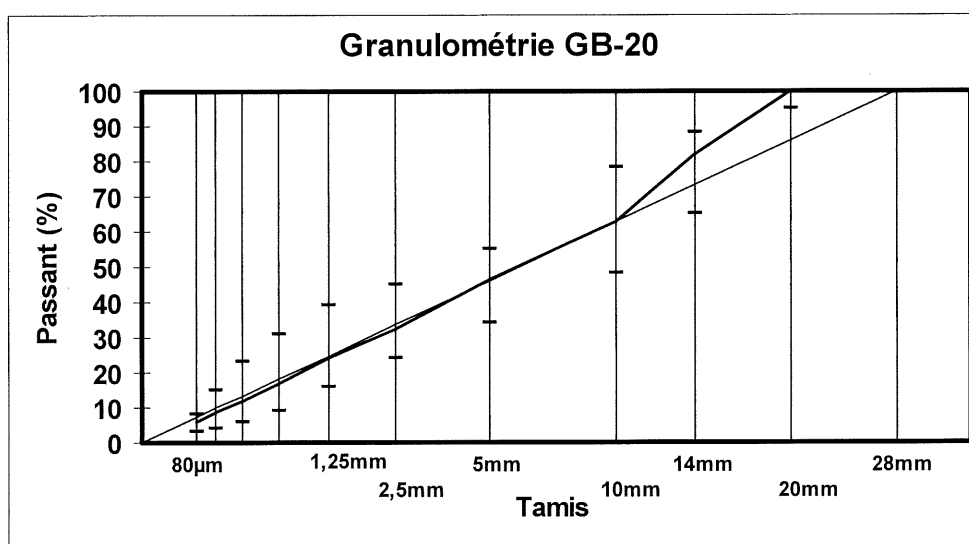


Figure 5.2 – Granulométrie des enrobés GB-20.

La granulométrie influence principalement la maniabilité et les caractéristiques volumétriques de l'enrobé, en particulier la quantité de bitume que l'on peut y introduire. La maniabilité de l'enrobé est évaluée par l'essai à la presse à cisaillement giratoire dont on retrouve les résultats au tableau 5.1 pour chaque granulométrie. On rappelle que la maniabilité n'est pas influencée par le type de bitume employé.

Tableau 5.1 – Teneur en vides (%) mesurée par l’essai à la PCG.

Enrobé	10 girations	80 girations	100 girations	120 girations	200 girations
ESG-14	12,1 %	4,4 %	3,8 %	2,8 %	2,2 %
GB-20	14,7 %	7,1 %	6,4 %	5,9 %	4,3 %

En ce qui concerne la quantité de bitume employée pour la formulation de l’enrobé, on la décrit généralement sous deux formes, soit la teneur massique en bitume ou le volume de bitume effectif VBE tous deux données au tableau 5.2 pour les deux granulométries étudiées. On retrouve également au tableau 5.2 la densité maximale des enrobés ainsi que la compacité moyenne des poutres fabriquées. La densité brute ainsi que la compacité de chacune des poutres employées pour l’étude sont présentées à l’annexe III qui permet d’apprécier la consistance de la méthode de préparation des poutres développée au chapitre 4. Bien que l’on observe un écart de compacité entre les deux types d’enrobés, une étude comparative demeure valable puisque que le point de référence est l’énergie fournie au compactage, qui est identique pour les deux mélanges. Cet état permet d’apprécier la plus grande maniabilité de l’enrobé ESG-14.

Tableau 5.2 – Description volumétrique des enrobés ESG-14 et GB-20.

Enrobé	T. bitume	VBE	D max	Compacité
ESG-14	5,0 %	11,4 %	2,627	94,2 %
GB-20	4,4 %	10,2 %	2,648	93,0 %

5.1.2 Bitume

Les deux bitumes employés dans le cadre de cette étude ont été largement utilisés au Québec ces dernières années. Il s’agit d’un bitume non-modifié, dit conventionnel, et d’un bitume modifié avec un adjuvant aux polymères. Le bitume aux polymères contient 3% de SBS qui ont été ajouté à un bitume brut qui n’est pas le bitume conventionnel employé pour cette étude. Une caractérisation complète des bitumes selon la norme 4101 « Bitumes » a été effectuée. Le classement des bitumes est indiqué au tableau 5.3 où l’on retrouve la classe PG « Performance Grade » des bitumes ainsi que leur limites réellement mesurées en laboratoire et leur écart. Les résultats de la caractérisation des bitumes se retrouvent en annexe III.

**Tableau 5.3 – Classes PG des bitumes employés
pour la formulation des enrobés ESG-14 et GB-20.**

	Conventionnel	Polymère
Classe PG	58-28	64-28
PG réel	63-28	70-32
Δ PG réel	91	102

5.2 Méthodologie

Avant de débiter l'analyse des résultats, il est important de décrire brièvement les essais effectués pour caractériser les paramètres discutés. Dans un premier temps, la caractérisation de la rigidité et de l'angle de phase a été effectuée en parallèle. Par la suite, la résistance à la fatigue a été caractérisée. L'enrobé ESG-14 a été caractérisé avant l'enrobé GB-20.

5.2.1 Rigidité et angle de phase

Dans le cadre de cette étude, la rigidité et l'angle de phase des enrobés ont été caractérisés par l'essai de fatigue et l'essai de balayage de fréquence de manière à établir l'écart entre les deux valeurs. La rigidité retenue de l'essai de fatigue est mesurée suite à 50 cycles. Les essais de fatigue ont été effectués avec un niveau de déformation constant en appliquant deux niveaux de déformation sélectionnés de manière à atteindre la rupture suite à environ 35 000 et 350 000 cycles. Trois répliques ont généralement été effectuées à chacun de ces niveaux. En ce qui concerne les essais de balayage de fréquence, le niveau de sollicitation appliqué est inférieur à 100 $\mu\text{m/m}$ sur une durée d'environ une minute de manière à ne pas endommager l'enrobé. On effectue généralement trois répliques de chaque essai.

Quatre températures ont été caractérisées pour l'enrobé ESG-14, soit 5, 10, 15 et 20°C et une température supplémentaire a été ajoutée dans l'étude du GB-20, soit 30°C. Les essais de balayage de fréquence ont été effectués uniquement sur l'enrobé GB-20 à 5, 10, 15 et 20°C. En ce qui concerne l'enrobé ESG-14, sa caractérisation était terminée au moment où la décision d'effectuer cet essai a été prise.

5.2.2 Résistance à la fatigue

Au total 18 relations de Whöler ont été caractérisées, soit la combinaison de 2 granulométries, 2 types de bitume et de 4 ou 5 températures. En plus des 6 essais effectués par droite, soit trois répliques à deux niveaux de déformation, des essais additionnels ont été nécessaires afin de déterminer les niveaux de déformation à employer pour obtenir environ 35 000 et 350 000 cycles à la rupture. Les résultats obtenus des essais supplémentaires n'ont pas été employés pour la caractérisation de la relation de Whöler puisqu'il s'agit de valeurs dont on ne connaît pas la variabilité. Des essais à basse température ont été ajoutés afin de compléter l'étude de l'influence de la température sur les résultats.

5.3 Caractérisation de la rigidité

Une grande quantité d'essais de fatigue a été réalisée dans le cadre de cette étude. À chacun de ces essais est associée une valeur de rigidité qui diminue au cours de l'essai. Pour la caractérisation de modèles de rigidité on peut employer la rigidité initiale mesurée suite à 50 cycles. Dans ce cas, il s'agit de modèles associés aux essais de fatigue, soit un essai d'endommagement de l'enrobé effectué à une fréquence unique de 10 Hz. Il ne faut pas confondre ces modèles avec les modèles basés sur des essais de balayage de fréquence à faible niveau de sollicitation, une approche qui permet la caractérisation de la rigidité sans endommager l'enrobé. Une discussion est prévue concernant les valeurs obtenues par les deux essais afin de déterminer quel type d'essai doit être privilégié pour la caractérisation de la rigidité. Par la suite, une étude sur l'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue est présentée.

5.3.1 Résultats des essais de fatigue

Pour chaque essai de fatigue effectué, il existe deux valeurs de rigidité initiale, soit S_{50} mesurée suite à 50 cycles et S_0 extrapolée de la phase stable d'endommagement, conformément à la définition de la section 3.2.4. Pour la modélisation de la rigidité initiale, uniquement la valeur de S_{50} est retenue puisque la valeur de S_0 présente un endommagement

significatif par l'échauffement. On émet l'hypothèse que S_{50} n'est pas influencé par le niveau de déformation appliqué, ce qui est généralement vérifié et permet de simplifier le développement des modèles de rigidité. Ainsi, il est possible de présenter à la figure 5.3 simplement les valeurs de rigidité S_{50} moyennes obtenues pour chaque température indépendamment du niveau de déformation appliqué. Le coefficient de variation des valeurs de rigidité présentées est en moyenne de 7 % et ne dépasse pas 15 %. Ces valeurs sont présentées à l'annexe IV.

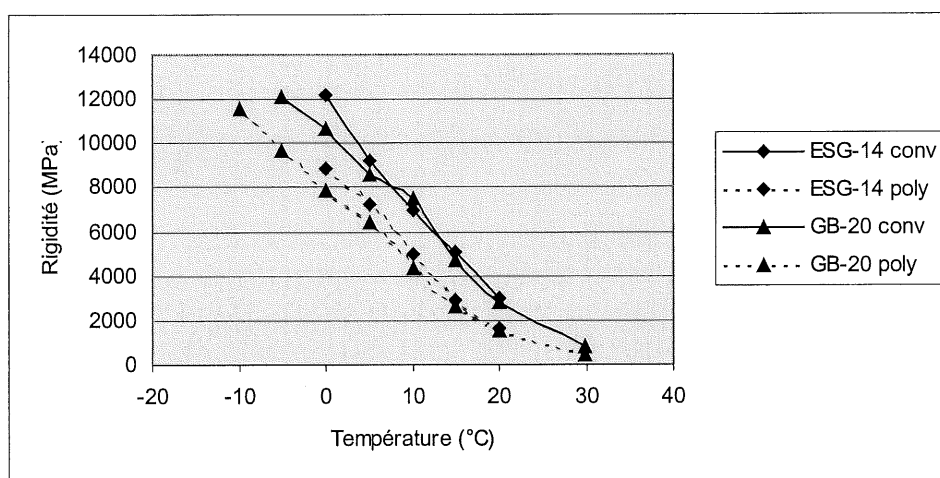


Figure 5.3 – Distribution de S_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

On observe sur la figure que la rigidité de l'enrobé diminue avec l'augmentation de la température. On remarque également que la rigidité des enrobés formulés avec du bitume polymère est inférieure à celle des enrobés formulés au bitume conventionnel, indépendamment de la granulométrie employée. Les courbes semblent se superposer en fonction du type de bitume, ce qui semble indiquer que le type de bitume employé a une influence plus importante sur la rigidité que la granulométrie, en ce qui concerne les enrobés étudiés. De plus, on remarque que la rigidité varie beaucoup en fonction de la température. Pour une plage de température de 5 à 20°C, la rigidité des enrobés formulés au bitume polymère varie d'environ 7 000 à 1 500 MPa et pour les enrobés formulés au bitume

conventionnel elle varie d'environ 9 000 à 3 000 MPa. Cette variation indique que la température a une influence majeure sur la rigidité de l'enrobé.

Par ailleurs, il semble que l'effet de la température s'atténue à 30°C. Ce type de distribution a été caractérisé par certains auteurs par des essais de balayage de fréquence et ils ont conclu que la distribution de la rigidité en fonction de la température et de la fréquence devrait être en forme de « S », soit tendre vers une asymptote à ses extrémités [Fonseca 1995, Alavi & Monismith 1995, Sousa & Weissman 1995]. Zhang conclue que la distribution de la rigidité tend vers une asymptote à basse et à haute fréquence, ou haute et basse température, ce qui correspond respectivement à la valeur de rigidité du squelette granulaire et du bitume [Zhang 1997]. En effet, conformément au classement proposé par Goodrich [Goodrich 1991], il est généralement convenu que le bitume contrôle le comportement de l'enrobé à basse température (haute fréquence) et que le squelette granulaire contrôle le comportement à haute température (basse fréquence).

La caractérisation des enrobés ESG-14 et GB-20 reproduit en fonction de la température une partie des observations faites par ces auteurs. En effet, on remarque à la figure 5.3 qu'à haute température la rigidité tend vers zéro, ce qui laisse supposer qu'il existe une asymptote puisque la rigidité ne peut pas être négative. En ce qui concerne l'asymptote à basse température, les données sont insuffisantes pour la situer. Pour une température de 0°C, les courbes de distribution de la rigidité en fonction de la température ne semblent pas fléchir vers une asymptote, ce qui indique que la limite se situe à une température inférieure. Ainsi, ces observations mettent en évidence que la rigidité peut varier sur une plage de température importante qui semble couvrir les températures généralement considérées pour l'étude de l'endommagement par fatigue des enrobés. Cette discussion est reprise à la section 5.4 sur la caractérisation de l'angle de phase puisqu'il s'agit d'un paramètre complémentaire à la rigidité, indispensable à la compréhension de l'influence de la température.

Il est également possible de décrire les distributions observées par des modèles. On emploie généralement un modèle de type logarithmique pour caractériser la rigidité en fonction de la

température, tel que présenté à la section 2.11.1. En appliquant le logarithme à la rigidité, ce type de modèle permet d'éviter que la valeur de la rigidité soit négative. En ce qui concerne cette étude, un modèle logarithmique quadratique a été retenu, ce qui donne une plus grande précision que le modèle linéaire. Au tableau 5.4 on retrouve ce type de modèle développé pour chaque type d'enrobé ainsi qu'en fonction de la granulométrie et du type de bitume. Les modèles sont fournis avec leur coefficient de détermination R^2 , leur écart type σ et leur degré de liberté DL. On retrouve également un modèle général qui représente l'ensemble des données. Pour le développement des modèles toutes les valeurs obtenues ont été employées et non uniquement les moyennes présentées à la figure 5.3. Les modèles sont valides pour une plage de température de 0 à 20°C et une fréquence de 10 Hz.

Tableau 5.4 – Modèles de rigidité S_{50} (MPa) en fonction de la température T (°C) pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

Description	Modèle	R^2	σ	DL
ESG-14 conv	$\text{Log } S_{50} = 4,073 - 0,0170 T - 0,0006 T^2$	0,99	0,037	28
ESG-14 poly	$\text{Log } S_{50} = 3,971 - 0,0184 T - 0,0010 T^2$	0,99	0,038	37
GB-20 conv	$\text{Log } S_{50} = 4,033 - 0,0118 T - 0,0008 T^2$	0,97	0,032	33
GB-20 poly	$\text{Log } S_{50} = 3,918 - 0,0215 T - 0,0008 T^2$	0,99	0,030	38
ESG-14	$\text{Log } S_{50} = 4,012 - 0,0160 T - 0,0009 T^2$	0,83	0,102	68
GB-20	$\text{Log } S_{50} = 3,969 - 0,0173 T - 0,0007 T^2$	0,92	0,118	74
Conventionnel	$\text{Log } S_{50} = 4,042 - 0,0117 T - 0,0009 T^2$	0,99	0,036	64
Polymère	$\text{Log } S_{50} = 3,942 - 0,0204 T - 0,0008 T^2$	0,99	0,041	78
Général	$\text{Log } S_{50} = 3,987 - 0,0173 T - 0,0008 T^2$	0,90	0,111	145

On remarque que tous les modèles présentent une précision acceptable comme l'indique le coefficient de détermination R^2 généralement supérieur à 90%. On peut même affirmer que les modèles individuels et en fonction du type de bitume présentent une grande précision. Ainsi, il semble que l'influence du bitume sur la rigidité soit plus importante que celle des granulats. Le modèle général semble présenter une précision suffisante pour être considéré pour la conception des chaussées. Par contre, il s'agit d'un modèle développé à partir de la rigidité initiale mesurée d'un essai de fatigue, ce qui ne constitue pas nécessairement la rigidité à employer pour la conception.

5.3.2 Résultats des essais de balayage de fréquence

Afin de compléter l'analyse de la rigidité, des essais de balayage de fréquence ont été effectués sur l'enrobé GB-20. Le module dynamique E (rigidité) obtenu de ces essais peut être exprimé en fonction de la fréquence sous forme d'isothermes à la figure 5.4 ou en fonction de la température sous forme d'isochrones à la figure 5.5. Les valeurs présentées sont les moyennes de trois répliques dont le coefficient de variation est toujours inférieur à 10%. Ces données peuvent être vérifiées à l'annexe IV.

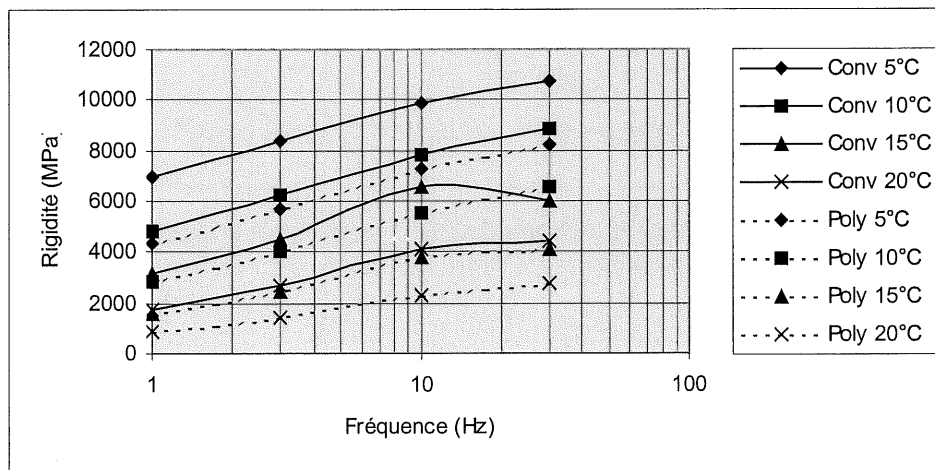


Figure 5.4 – Isothermes de E pour les enrobés GB-20.

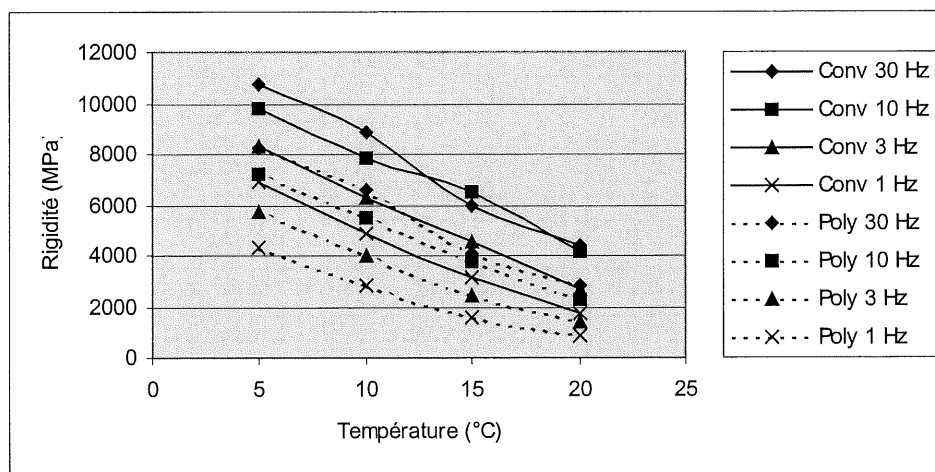


Figure 5.5 – Isochrones de E pour les enrobés GB-20.

Évidemment, on observe sur les figures que E diminue avec l'augmentation de la température conformément aux observations sur les essais de fatigue. Conséquemment, on observe que E augmente avec l'augmentation de la fréquence de chargement. Tel que discuté précédemment, la rigidité de l'enrobé formulé au bitume polymère est inférieure à son homologue. Aucune courbe ne tend vers une asymptote sur la plage de température et de fréquence couverte par l'étude. Ainsi, il est possible de caractériser la rigidité en fonction de la température et du logarithme de la fréquence par une relation logarithmique linéaire, tel que présentée au tableau 5.5 en fonction du type de bitume et de manière générale pour l'ensemble des résultats obtenus. Le coefficient de détermination R^2 , l'écart-type σ et le degré de liberté DL sont également indiqués. Les modèles présentés sont uniquement valides pour une plage de température de 5 à 20°C et une fréquence de 1 à 30 Hz. À l'extérieur de ces limites la rigidité peut évoluer d'une manière sensiblement différente.

Tableau 5.5 – Modèles de rigidité E (MPa) en fonction de la température T (°C) et de la fréquence fr (Hz) pour les enrobés GB-20.

Bitume	Modèle	R^2	σ	DL
Conventionnel	$\text{Log } E = 3,97 - 0,031 T + 0,199 \log \text{ fr}$	0,94	0,055	45
Polymère	$\text{Log } E = 3,81 - 0,038 T + 0,269 \log \text{ fr}$	0,96	0,056	45
Général	$\text{Log } E = 3,89 - 0,035 T + 0,234 \log \text{ fr}$	0,79	0,123	93

Les modèles développés en fonction du type de bitume sont très précis mais moins pratiques à employer qu'un modèle général pour la conception des chaussées. Par contre, le modèle général manque légèrement de précision pour être recommandé. Pour augmenter la précision du modèle, il faudrait ajouter un paramètre concernant le type de bitume. Pour le moment, le modèle ne sera pas modifié puisque l'on dispose uniquement de données concernant deux types de bitume. Il est à noter que le modèle général au tableau 5.5 est équivalent au modèle GB-20 caractérisé par l'essai de fatigue au tableau 5.4. Bien que leur coefficient de détermination R^2 soient différents, ces deux modèles présentent une précision équivalente puisqu'ils possèdent un écart type σ similaire.

5.3.3 Comparaison entre l'essai de fatigue et l'essai de balayage de fréquence

Maintenant que l'on dispose de quelques modèles pour caractériser la rigidité, on peut se demander lequel employer pour la conception. En premier lieu, on doit déterminer s'il est nécessaire d'effectuer l'essai de balayage de fréquence en plus de l'essai de fatigue qui fournit également une valeur de rigidité initiale de l'enrobé. La question revient à analyser l'écart entre E et S_{50} afin de déterminer la valeur pertinente pour la conception. Pour ce faire, on peut comparer à la figure 5.6 la distribution de S_{50} et E pour l'enrobé GB-20 en fonction de la température pour une fréquence identique de 10 Hz.

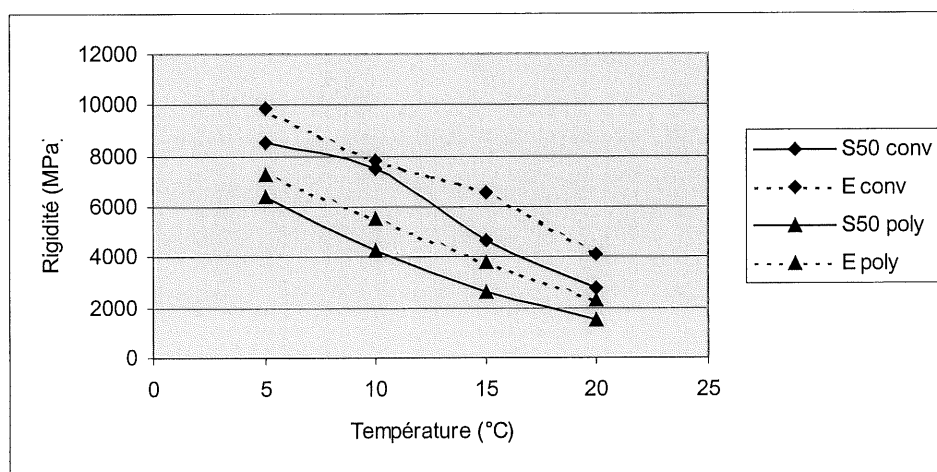


Figure 5.6 – Distribution de S_{50} et E en fonction de la température pour les enrobés GB-20.

On constate sur la figure que les valeurs de S_{50} obtenues de l'essai de fatigue sont plus faibles que les valeurs de E obtenues des essais de balayage de fréquence. La différence entre les valeurs semble attribuable à l'endommagement accumulé par l'enrobé lors des 50 premiers cycles de chargement de l'essai fatigue. Il semble également que l'écart entre les deux valeurs est relativement constant sur la plage de température étudiée. Mis à part l'enrobé formulé avec le bitume conventionnel à 10°C, l'écart moyen est d'environ 1 220 MPa avec un coefficient de variation de 27%. Bien que l'écart entre les deux valeurs de rigidité semble constant, un coefficient de variation aussi élevé et la faible quantité de résultats disponibles ne permettent pas de statuer sur un facteur de correction entre S_{50} et E .

Ainsi, il semble que l'emploi du module dynamique E soit indiqué pour la conception des chaussées puisqu'il constitue la valeur de rigidité maximale de l'enrobé, soit sa rigidité avant l'influence d'un endommagement. De plus, l'essai de balayage de fréquence permet d'obtenir les valeurs de module dynamique E pour plusieurs conditions de température et de fréquence avec une même poutre contrairement à l'essai de fatigue qui nécessite une nouvelle poutre pour chaque condition de chargement.

5.3.4 Évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue

Un autre aspect intéressant de la rigidité est son évolution lors de l'essai de fatigue. L'étude de la rigidité dans ce contexte aide à mieux comprendre le processus d'endommagement par fatigue en laboratoire. L'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue est présentée à la figure 5.7, tel que constaté en laboratoire. Les termes S_{50} et S_0 sont employés pour caractériser les conditions initiales de l'essai, tel que discuté à la section 3.2.4. Les termes $S_{1/2}$ et S_r représentent les valeurs de rigidité mesurées lors de la rupture définie selon $N_{1/2}$ et N_r , tel que discuté à la section 3.2.3. Cette section permet, par la comparaison des différentes valeurs de rigidités mesurées lors de l'essai de fatigue, de démontrer la pertinence d'établir un nouveau critère pour la rupture.

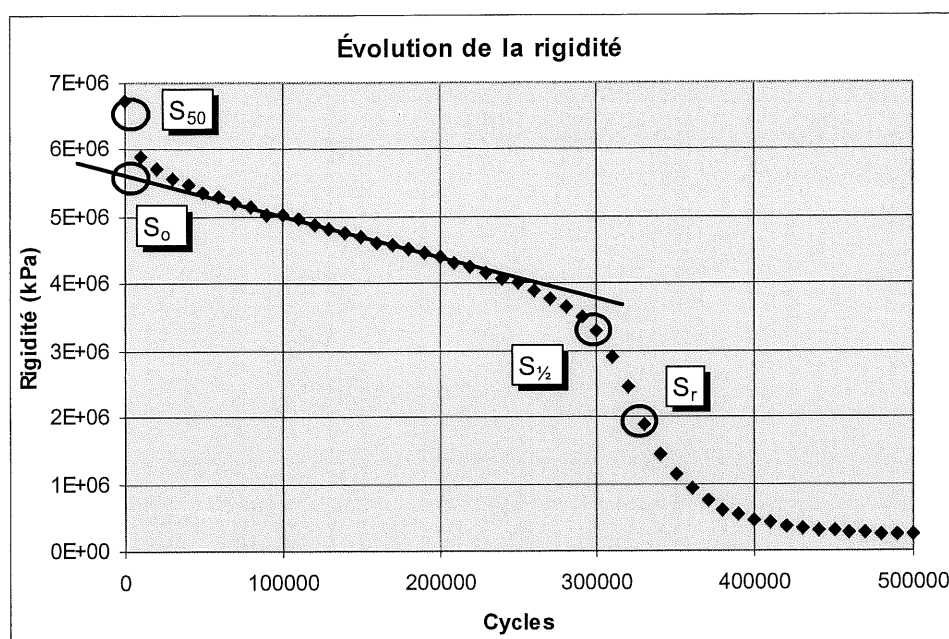


Figure 5.7 – Description de l'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue par S_{50} , S_0 , $S_{1/2}$ et S_r .

En première analyse, on peut comparer la distribution des valeurs de rigidité initiales en fonction de la température à la figure 5.8. On constate que S_0 est généralement inférieur à S_{50} . On remarque également que leurs valeurs sont pratiquement égales à haute et à basse température alors que leur écart est maximal à 10°C. Si on normalise les résultats en divisant une courbe par rapport à l'autre à la figure 5.9, on remarque que le rapport S_0/S_{50} diminue avec l'augmentation de la température. En effet, si l'on considère que S_{50} représente l'unité quelle que soit sa valeur, le rapport S_0/S_{50} moyen passe de 92% à 5°C à 65% à 20°C, ce qui signifie que l'écart relatif entre les deux valeurs de rigidité augmente avec la température. Ce constat indique que la période d'échauffement qui sépare S_{50} et S_0 prend de l'ampleur avec l'augmentation de la température. Ainsi, il semble que la majorité de l'endommagement à 20°C est imputable à l'échauffement et non à la fatigue puisqu'on note une perte de rigidité de 35% lors de la période d'échauffement alors que la rupture par fatigue est définie par la norme par une perte de rigidité de 50%. De plus, on constate que le bitume polymère semble présenter une perte de rigidité légèrement plus importante que le bitume conventionnel lors de cette période. On observe également une légère augmentation du rapport à 30°C, donc une

diminution de l'influence de la période d'échauffement. Ces observations sont commentées subséquemment. Les rapports présentés sont les moyennes des résultats obtenus pour un enrobé à une température. Leur coefficient de variation est généralement inférieur à 10%, tel qu'indiqué en annexe IV.

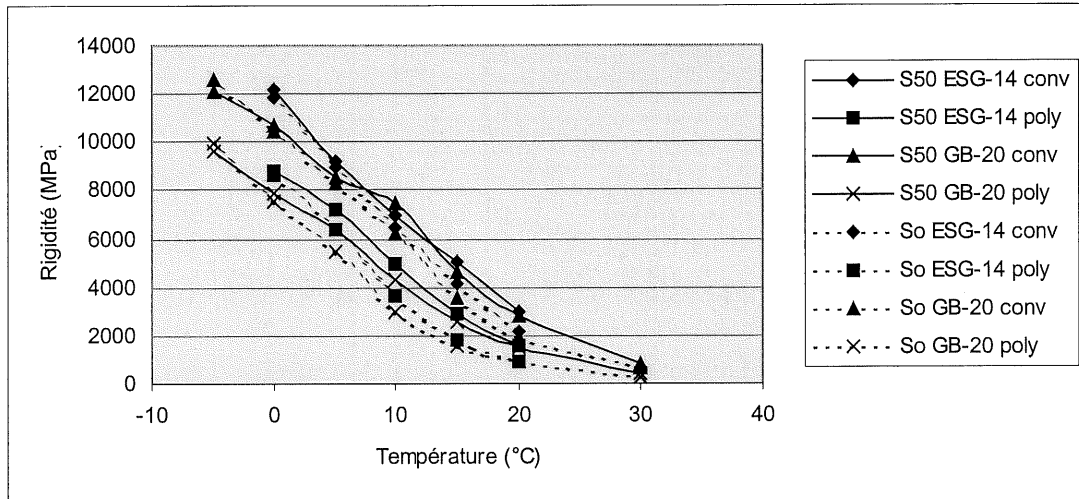


Figure 5.8 – Distribution de S_0 et S_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

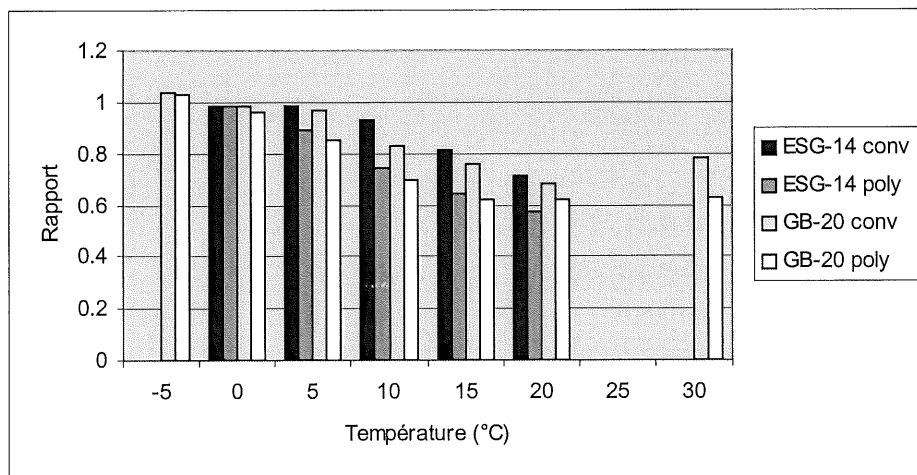


Figure 5.9 – Histogramme des rapports S_0/S_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

Il est également intéressant d'observer à la figure 5.10, la distribution en fonction de la température des valeurs de rigidité définies par la norme, soit S_{50} et $S_{1/2}$. On constate que les courbes sont relativement éloignées à basse température et qu'elles se rapprochent avec l'augmentation de la température. Par ailleurs, le rapport $S_{1/2}/S_{50}$ est constant puisqu'il est fixé à 50% par la norme d'essai. Cette approche semble restreindre la caractérisation de la résistance à la fatigue de l'enrobé puisqu'il ne tient pas compte de l'influence de la période d'échauffement.

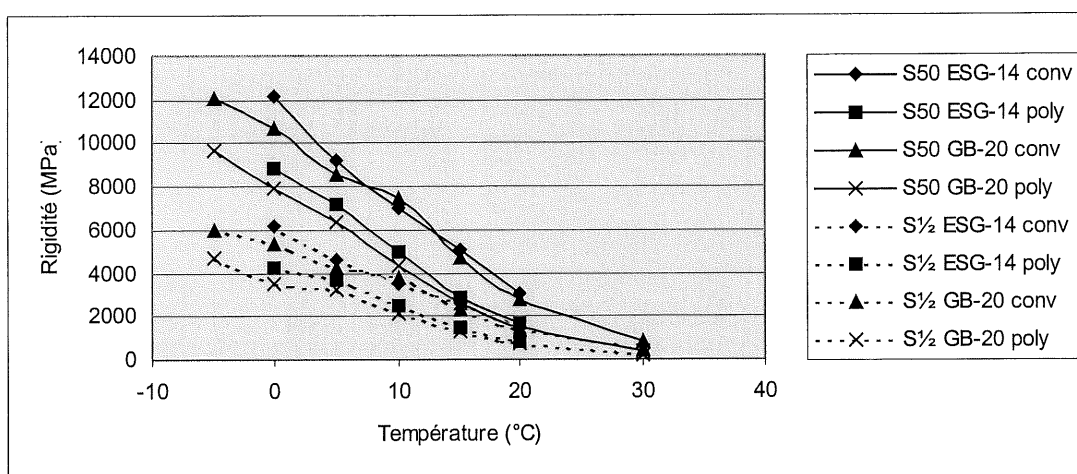


Figure 5.10 – Distribution de $S_{1/2}$ et S_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

Pour palier aux lacunes de la norme, une approche alternative pour caractériser la rupture par fatigue a été proposée à la section 3.2.3. La rigidité mesurée selon la définition alternative de la rupture S_r présente un coefficient de variation pouvant atteindre 35%, ce qui est plus élevé que le coefficient de variation de $S_{1/2}$ qui ne dépasse pas 15%, tel qu'indiqué en annexe IV. Ce constat semble logique puisque l'approche pour déterminer S_r est certainement influencée par un plus grand nombre de facteurs, principalement en ce qui concerne la rhéologie de l'enrobé, ce qui semble souhaitable à notre point de vue.

Si l'on compare la distribution de S_r et S_{50} en fonction de la température à la figure 5.11, on observe une tendance au rapprochement des courbes avec l'augmentation de la température

comme pour la distribution de $S_{1/2}$ et S_{50} . Par ailleurs, si on analyse le rapport S_r/S_{50} à la figure 5.12, on remarque que ce rapport n'est pas constant mais qu'il diminue avec l'augmentation de la température variant d'une moyenne de 39% à 5°C jusqu'à 28% à 20°C. Ainsi, le rapport S_r/S_{50} semble inférieur à 50%, ce qui situe la rupture plus loin dans l'évolution de la rigidité que le suggère la norme. De plus, le rapport diminue ce qui signifie que la section où se produit principalement l'endommagement par fatigue sur la courbe d'évolution de la rigidité (figure 5.7) s'allonge ou que sa pente s'accroît, aspect que la définition de la rupture selon la norme ne prend pas en compte. Cette tendance n'est valable que pour une certaine plage de température puisque le rapport augmente à 30°C lorsque la rigidité de l'enrobé devient très faible.

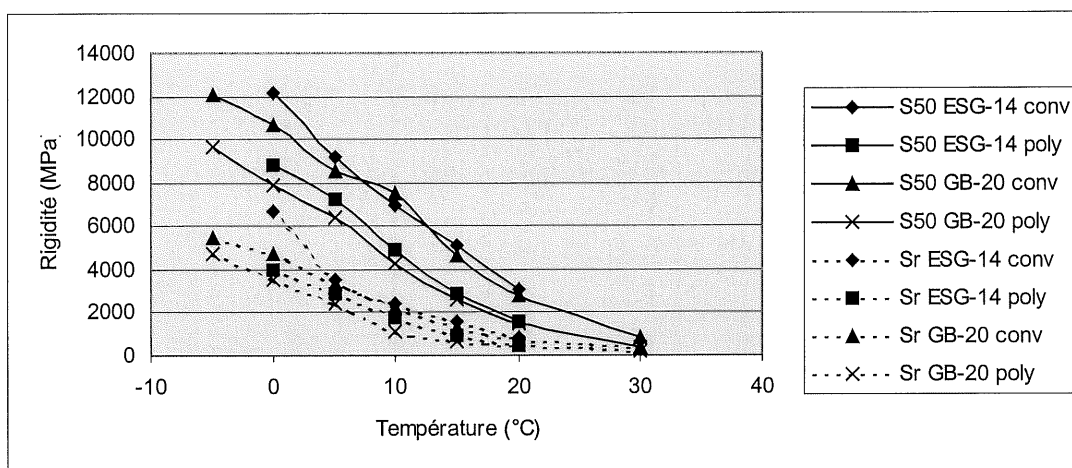


Figure 5.11 – Distribution de S_r et S_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

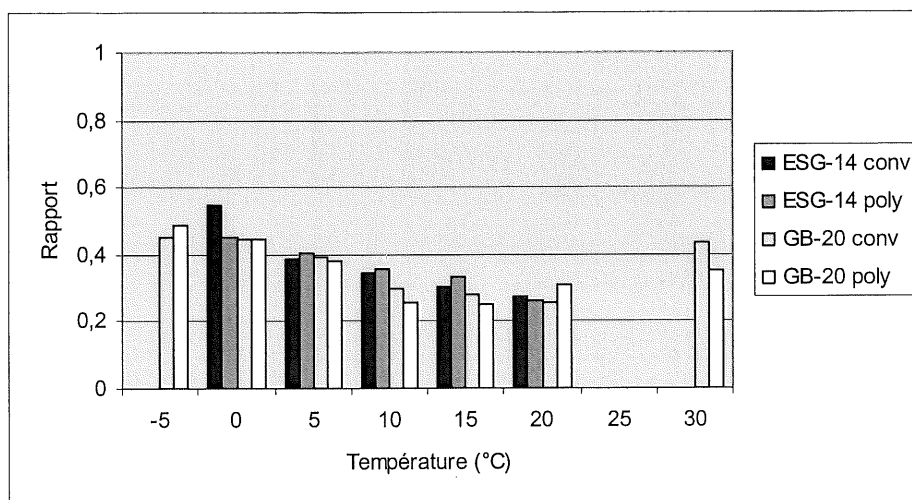


Figure 5.12 – Histogramme des rapports S_r/S_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

La rigidité initiale S_0 permet de quantifier la perte de rigidité par fatigue sans tenir compte de la période d'échauffement au début de l'essai. Si on compare sa distribution avec la distribution de $S_{1/2}$ à la figure 5.13, on observe encore la tendance des courbes à se rapprocher avec l'augmentation de la température. Par ailleurs, on constate à la figure 5.14 que le rapport moyen $S_{1/2}/S_0$ augmente de 55% à 5°C à 78% à 20°C.

Le rapport $S_{1/2}/S_0$ indique la perte de rigidité engendrée principalement par fatigue lorsque la rupture est définie selon la norme. Ainsi, à 5°C lorsque l'essai est effectué selon la norme, la perte de rigidité associée à la sollicitation par fatigue est d'environ 45%, ce qui signifie que l'effet d'échauffement est pratiquement nul. À 20°C, la perte de rigidité par fatigue est en moyenne de 22%, ce qui confirme que l'effet d'échauffement est important. Il est important de noter que le rapport $S_{1/2}/S_0$ n'est pas directement comparable avec le rapport de 50% $S_{1/2}/S_{50}$ puisqu'ils n'ont pas le même dénominateur.

Le type de bitume employé ainsi que la granulométrie ne semblent pas avoir une influence aussi marquée sur l'endommagement par fatigue que la température. Par ailleurs, étant donné que le coefficient de variation est généralement inférieur à 10% (annexe IV), il est possible d'observer que le bitume a légèrement plus d'influence sur l'évolution de l'endommagement

que la granulométrie dans le cadre de cette étude. Ainsi, le bitume polymère présente une moins grande perte de rigidité par fatigue, donc subit une plus grande influence de l'échauffement, lorsque $N_{1/2}$ est atteint sur une plage de température se situant entre 5 et 20°C. Ce constat confirme les observations précédentes sur le rapport S_0/S_{50} .

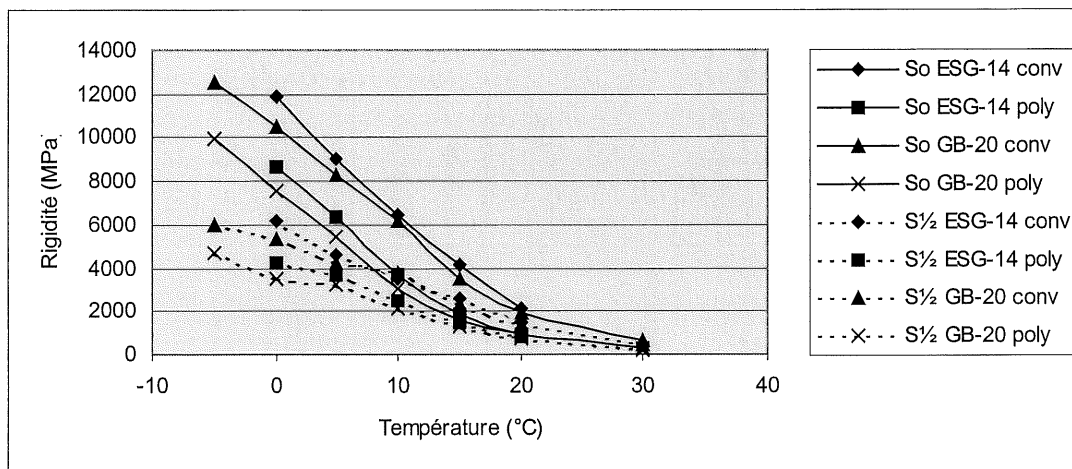


Figure 5.13 – Distribution de $S_{1/2}$ et S_0 en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

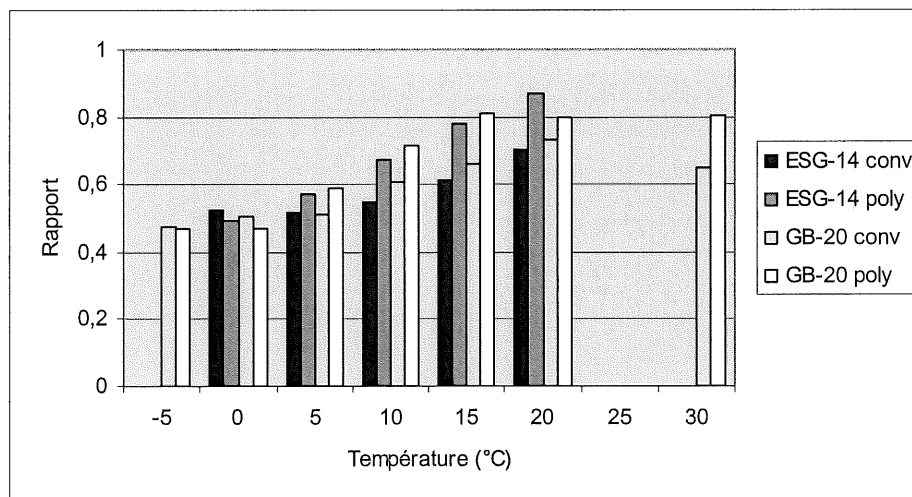


Figure 5.14 – Histogramme des rapports $S_{1/2}/S_0$ en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

Finalement, il est intéressant de comparer la distribution des valeurs de rigidité alternative S_0 et S_r en fonction de la température à la figure 5.15. Les distributions tendent vers un

rapprochement à haute température tel qu'observé généralement pour les autres paramètres mis en parallèle. Par ailleurs, le rapport S_r/S_o présenté à la figure 5.16 ne semble pas dessiner de tendance en fonction de la température. Il présente plutôt une valeur relativement constante d'environ 45%. Ce constat semble indiquer que la température a peu d'influence sur la perte de rigidité engendrée par fatigue lorsque la rupture est définie selon l'approche alternative proposée. Bien que le coefficient de variation associé aux rapports S_r/S_o puisse atteindre 30% (annexe IV), le coefficient de variation entre les rapports moyens est de 15%, ce qui semble acceptable. Ainsi, basé sur la définition alternative de la rupture, il est proposé de définir la perte de rigidité par fatigue en laboratoire par le rapport S_r/S_o . Ce rapport évite de tenir compte de la zone d'échauffement et semble peu influencé par la température, le type de bitume et la granulométrie.

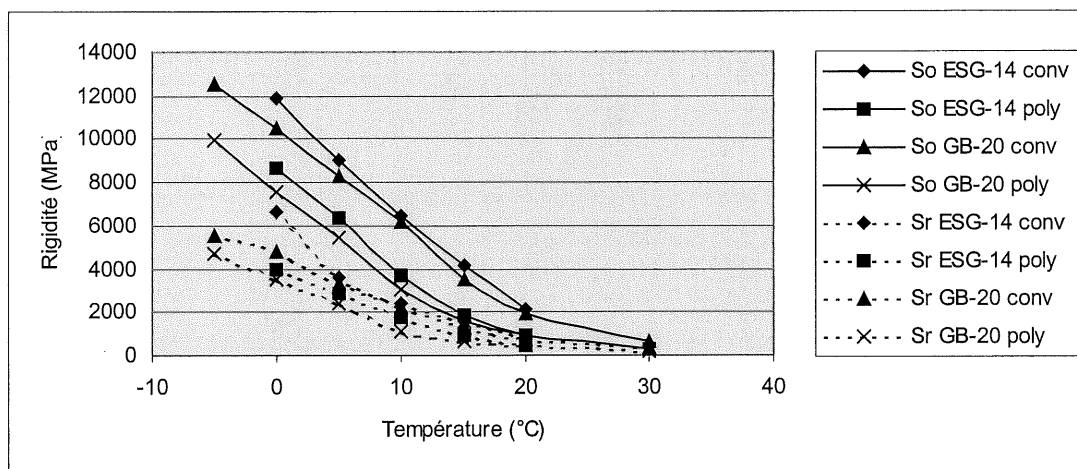


Figure 5.15 – Distribution de S_r et S_o en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

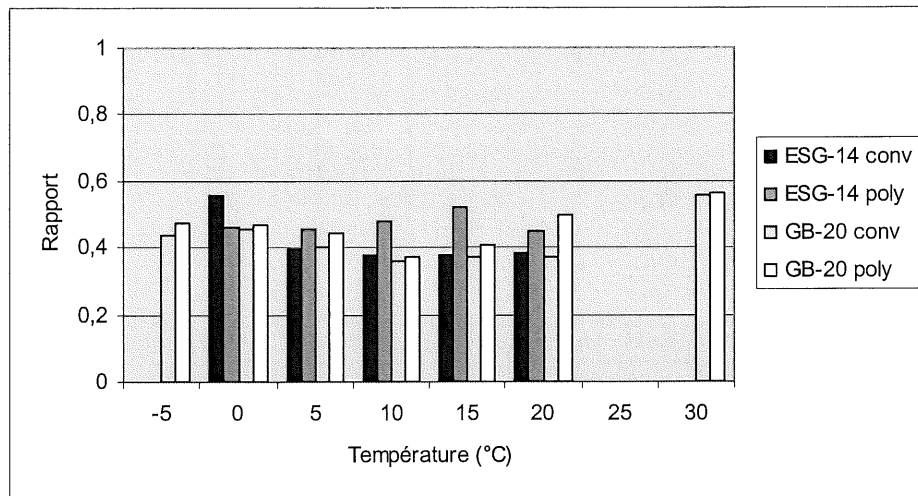


Figure 5.16 – Histogramme des rapports S_r/S_0 en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

5.4 Caractérisation de l'angle de phase

Pour chaque valeur de rigidité, il existe une valeur d'angle de phase qui lui est associée. Cette valeur permet de compléter l'information fournie par la rigidité de manière à définir le module complexe de l'enrobé, tel que présenté à la section 2.6.1. Dans le cadre de cette étude, les valeurs d'angles de phase proviennent des mêmes essais de fatigue et de balayage de fréquence effectués pour mesurer la rigidité. L'évolution de l'angle de phase lors de l'essai de fatigue est également analysée.

5.4.1 Résultats des essais de fatigue

De façon similaire à l'étude de la rigidité, il est possible de décrire la distribution de l'angle de phase initial de l'essai de fatigue ϕ_{50} en fonction de la température à la figure 5.17. Tel que convenu au niveau de la rigidité, on considère que la déformation appliquée n'a pas d'influence sur la valeur de l'angle, ce qui permet de présenter uniquement les valeurs moyennes sur le graphique.

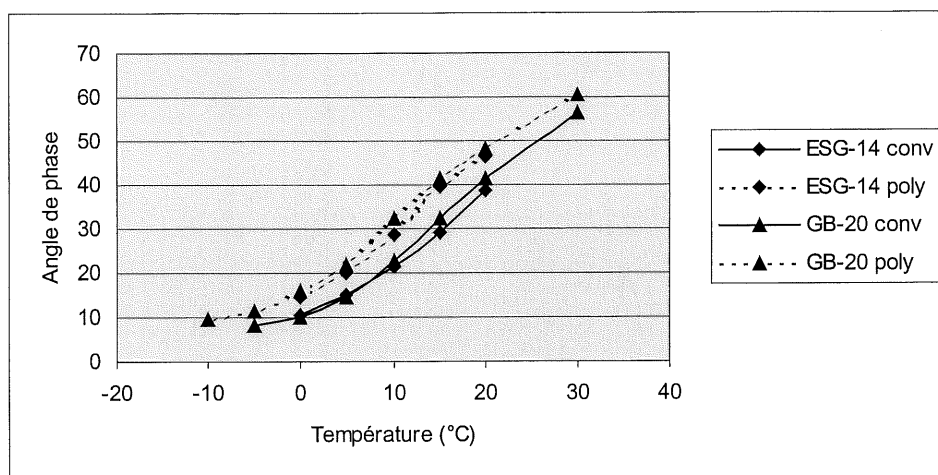


Figure 5.17 – Distribution de ϕ_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

En premier lieu, on observe sur la figure que la valeur de ϕ_{50} augmente avec l'augmentation de la température. On remarque également que les courbes semblent se confondre en fonction du type de bitume employé indépendamment de la granulométrie. Cette distribution semble indiquer que l'influence du bitume est plus importante que celle de la granulométrie, ce qui confirme les observations sur la rigidité. L'enrobé formulé avec un bitume conventionnel présente un angle de phase plus faible que celui formulé avec un bitume polymère. Pour les enrobés formulés avec le bitume conventionnel, l'angle de phase passe d'environ 15° à 5°C à 40° à 20°C . En ce qui concerne l'enrobé formulé avec le bitume polymère, l'angle de phase passe d'environ 21° à 5°C à 47° à 20°C . La température semble être le facteur le plus influent sur la valeur de l'angle de phase tout comme pour la valeur de rigidité.

Il semble se dessiner une asymptote à basse température puisque la valeur de l'angle ne peut être négative. À haute température, la distribution ne semble pas tendre vers une asymptote. D'ailleurs, le comportement anticipé de l'enrobé à haute température est une chute de la valeur de l'angle comme l'ont indiqué certains auteurs [Zhang 1997, Alavi & Monismith 1994, Sousa & Weissman 1994]. En effet, à température élevée le bitume perd de son influence sur le comportement de l'enrobé au profit du squelette granulaire. Les granulats sont considérés comme un matériau élastique, ce qui leur impute conséquemment une valeur d'angle de phase

nulle, tel que discuté à la section 2.6.3. En ce qui concerne la caractérisation des enrobés ESG-14 et GB-20, ce point de transition ne semble pas être atteint à 30°C. Ainsi, étant donné que la position du pic n'est pas connue, il ne semble pas pertinent de caractériser un modèle de la distribution de l'angle de phase en fonction de la température. De plus, ϕ_{50} ne constitue pas la valeur que l'on désire modéliser au même titre que la rigidité. Il semble que l'angle de phase tiré de l'essai de balayage de fréquence soit plus indiqué.

5.4.2 Résultats des essais de balayage de fréquence

Les essais de balayage de fréquence effectués sur l'enrobé GB-20 permettent de comparer l'angle de phase dynamique de l'enrobé ϕ avec l'angle de phase initial ϕ_{50} mesuré à partir de l'essai de fatigue. L'angle de phase dynamique ϕ a été caractérisé en variant la température et la fréquence de l'essai, ce qui permet de tracer les isothermes et isochrones de l'enrobé aux figures 5.18 et 5.19. Les valeurs présentées sont les moyennes de trois répliques du même essai effectué sur trois poutres différentes et le coefficient de variation de ces répliques est généralement inférieur à 10%, tel qu'indiqué en annexe IV.

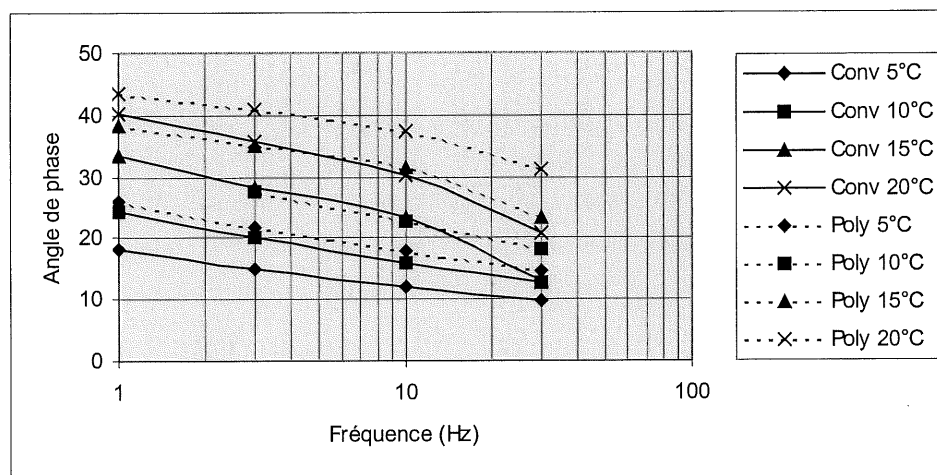


Figure 5.18 – Isothermes de ϕ pour les enrobés GB-20.

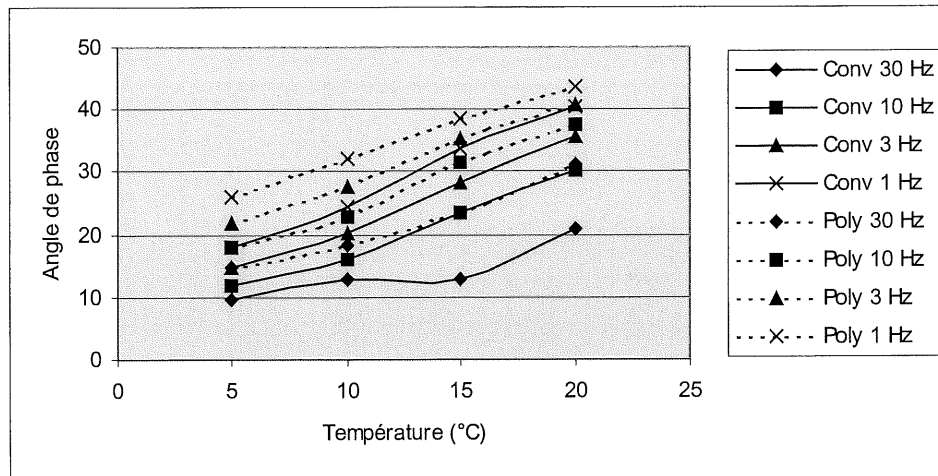


Figure 5.19 – Isochrones de ϕ pour les enrobés GB-20.

On observe sur les figures que ϕ diminue avec l'augmentation de la fréquence et que conséquemment il augmente avec l'augmentation de la température, ce qui confirme les observations sur les essais de fatigue. De même, l'angle est plus élevé pour l'enrobé formulé avec un bitume polymère. Comme pour l'étude de la rigidité, aucune courbe ne tend pas vers une asymptote sur la plage de température et de fréquence couverte par l'étude. Ainsi, il est facile de développer des modèles pour exprimer l'angle de phase en fonction de la température et de la fréquence. Le tableau 5.6 présente ces modèles pour chaque type de bitume et de manière générale pour l'ensemble des résultats obtenus. Les modèles présentés sont uniquement valides pour un enrobé GB-20 sur une plage de température de 5 à 20°C et de 1 à 30 Hz, ce qui est important de respecter puisque l'on ne connaît pas la position de l'asymptote à basse température ainsi que du pic à haute température.

Tableau 5.6 – Modèles d'angle de phase ϕ (°) en fonction de la température T (°C) et de la fréquence fr (Hz) pour les enrobés GB-20.

Type	Modèle	R ²	σ	D.L.
Conventionnel	$\text{Log } \phi = 1,16 + 0,024 T - 0,207 \log \text{ fr}$	0,96	0,026	45
Polymère	$\text{Log } \phi = 1,30 + 0,019 T - 0,143 \log \text{ fr}$	0,97	0,038	45
Général	$\text{Log } \phi = 1,23 + 0,022 T - 0,175 \log \text{ fr}$	0,80	0,079	93

Les modèles développés en fonction du type de bitume sont très précis mais moins pratiques que le modèle général. Par ailleurs, le modèle général manque un peu de précision pour être

recommandé. Il faudrait lui ajouter un paramètre pour tenir compte de l'influence du type de bitume. Étant donné que les résultats concernent uniquement deux types de bitume, le modèle ne sera pas modifié pour le moment.

5.4.3 Comparaison entre l'essai de fatigue et l'essai de balayage de fréquence

Au même titre que la rigidité, il est intéressant de comparer les valeurs de ϕ et ϕ_{50} à la figure 5.20 afin de confirmer la décision d'employer l'essai de balayage de fréquence pour la caractérisation de l'angle de phase de l'enrobé. Les valeurs de ϕ_{50} obtenues de l'essai de fatigue sont plus élevées que les valeurs de ϕ des essais de balayage de fréquence si on compare leur distribution en fonction de la température pour une fréquence de 10 Hz à la figure 5.20. On peut expliquer ce constat par l'endommagement qui s'accumule par échauffement au début de l'essai de fatigue, comme dans le cas de la rigidité. On remarque que l'écart entre ϕ_{50} et ϕ augmente légèrement avec l'augmentation de la température. Par ailleurs, le rapport ϕ_{50}/ϕ montré à la figure 5.21 semble constant avec une valeur moyenne de 1,33 et un coefficient de variation d'environ 6 %. Ainsi, il semble y avoir un endommagement non-négligeable lors des 50 premiers cycles de chargement de l'essai de fatigue, ce qui renforce la décision d'employer l'essai de balayage de fréquence pour mesurer les propriétés initiales de l'enrobé non-endommagé.

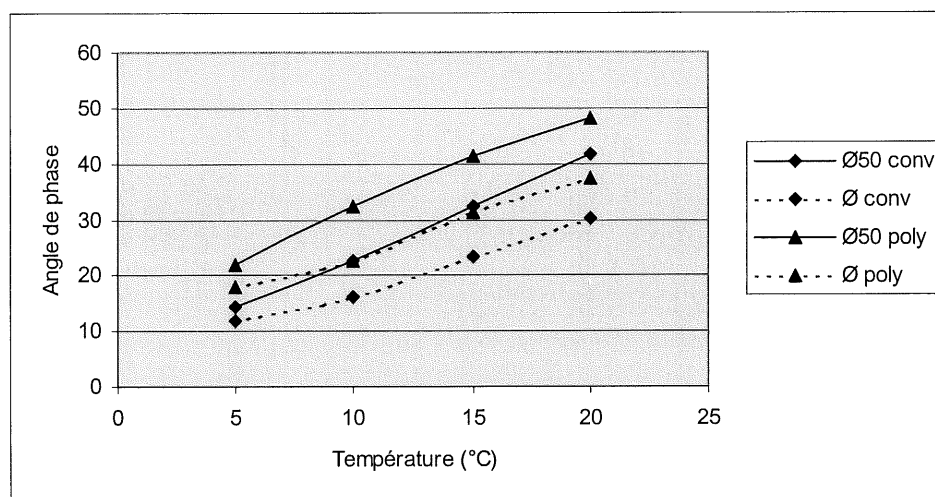


Figure 5.20 – Distribution de ϕ_{50} et ϕ en fonction de la température pour les enrobés GB-20.

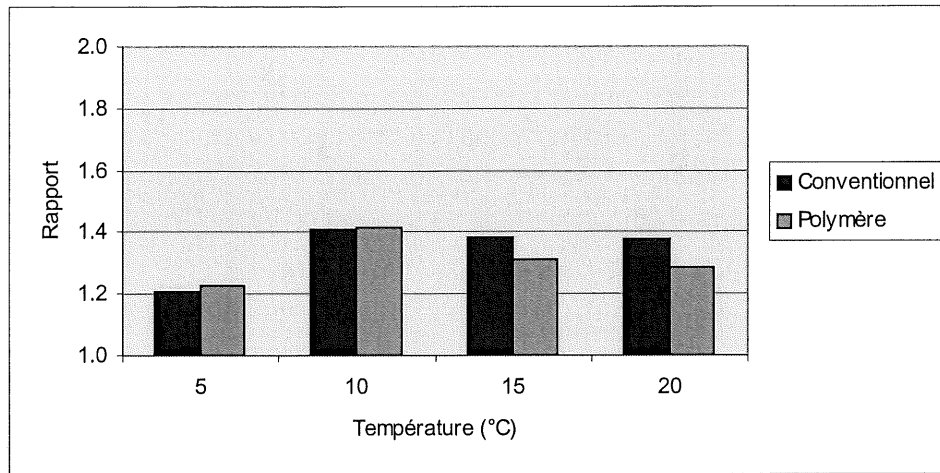


Figure 5.21 – Histogramme des rapports ϕ_{50}/φ en fonction de la température pour les enrobés GB-20.

5.4.4 Analyse du module complexe

La rigidité et l'angle de phase sont des paramètres liés par la définition du module complexe. Il existe plusieurs modes de représentation de cette valeur. Dans le cadre de cette étude, la représentation de Black, qui exprime l'angle de phase en fonction du logarithme de la rigidité, est employée. Elle est présentée pour les essais de fatigue en fonction de S_{50} et ϕ_{50} à la figure 5.22 et pour les essais de balayage de fréquence en fonction de E et φ à la figure 5.23. Les valeurs présentées sont les moyennes en fonction de la température et de la fréquence.

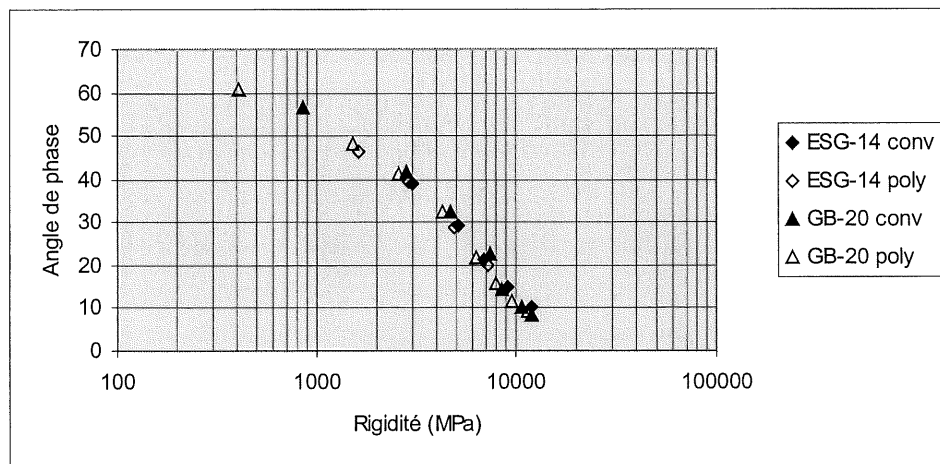


Figure 5.22 – Représentation de Black en fonction de S_{50} et ϕ_{50} pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

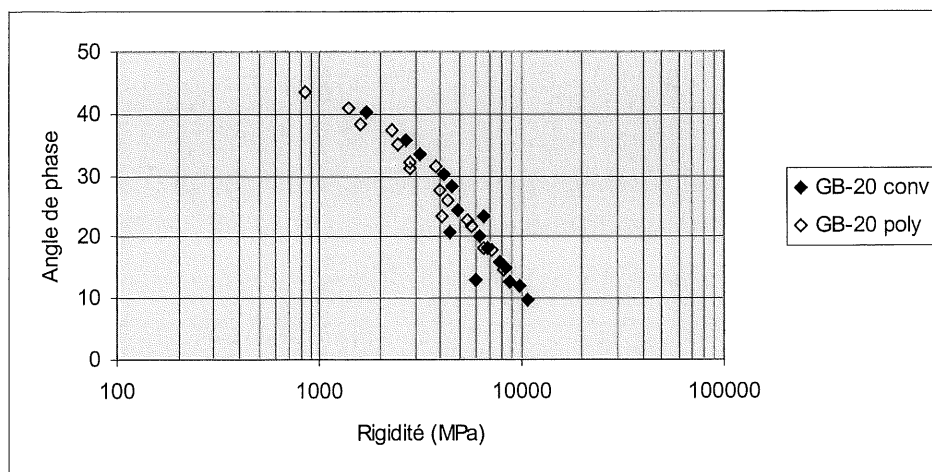


Figure 5.23 – Représentation de Black en fonction de E et ϕ pour l'enrobé GB-20.

On observe que les courbes se superposent quel que soit le type de bitume ou de granulométrie employés. Par ailleurs, on constate que les courbes données par chaque mode d'essai sont différentes. En effet, pour une rigidité de 1 000 MPa, il existe un écart d'environ 10° entre les deux modes d'essais. Par contre, les courbes semblent se rejoindre lorsque la rigidité augmente puisque pour une rigidité de 10 000 MPa l'angle est sensiblement le même. Ainsi, on démontre qu'il y a un écart important à haute température (basse fréquence) entre les conditions initiales de l'essai de fatigue et les indications données par l'essai de balayage de fréquence. Il semble qu'à basse température cet écart diminue. Ainsi, l'influence de la période d'échauffement au début de l'essai diminue avec la diminution de la température, ce qui confirme les observations sur l'analyse de l'évolution de la rigidité à la section 5.3.4.

À partir des représentations de Black, il est possible d'extrapoler la valeur de la rigidité lorsque la valeur de l'angle de phase est nulle. Cette valeur de rigidité est par définition le module élastique de l'enrobé. Pour caractériser cette valeur, toutes les données disponibles ont été employées en incluant les résultats de l'étude à basse température qui seront discutés à la section 5.5.3. Si l'on considère l'ensemble des résultats à la figure 5.24, on constate que le module élastique est influencé par la granulométrie contrairement à ce que semblait indiquer la représentation à partir des valeurs moyennes à la figure 5.22. Ainsi, la courbe de Black est

décrite en fonction du mode d'essai et de la granulométrie à la figure 5.24. Le module élastique pour l'essai de fatigue est environ de 15 350 MPa pour l'enrobé GB-20 et 16 260 MPa pour l'enrobé ESG-14 et de 15 860 MPa pour l'essai de balayage de fréquence avec l'enrobé GB-20. Les relations employées pour déterminer ces valeurs sont très précises selon les R^2 indiquées sur le graphique, ce qui confirme que le type de bitume a peu d'influence sur la distribution des données.

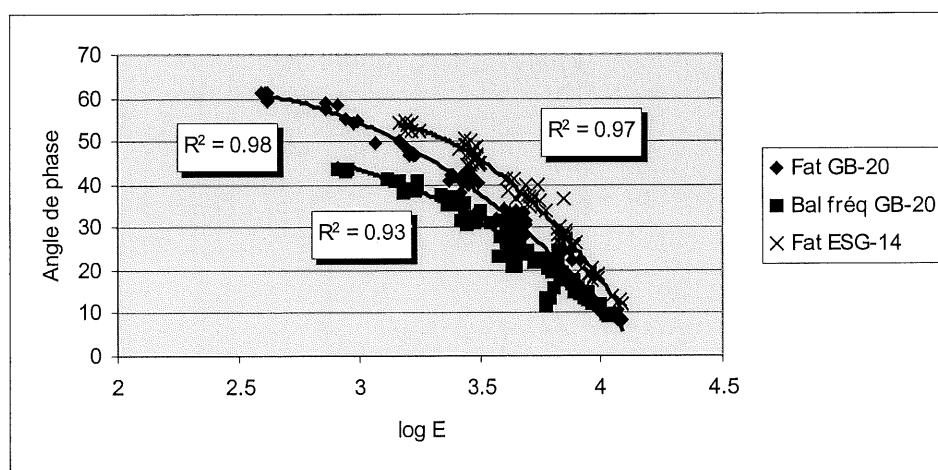


Figure 5.24 – Représentation de Black avec E et ϕ ainsi que S_{50} et ϕ_{50} pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

En ce qui concerne la valeur de l'angle de phase lorsque la rigidité tend vers zéro, on sait que sa valeur est zéro puisque la valeur de l'angle de phase diminue conjointement avec la rigidité lorsque la température est suffisamment élevée ou que la vitesse est suffisamment lente. De ce fait, l'objectif devient plutôt de situer la cassure dans l'évolution de l'angle de phase en fonction de la température et de la fréquence afin de déterminer à partir de quelles conditions d'essais l'influence du squelette granulaire devient un facteur prédominant.

5.4.5 Évolution de l'angle de phase lors de l'essai de fatigue

L'évolution de l'angle de phase lors de l'essai de fatigue se caractérise par une augmentation de sa valeur au cours de l'essai jusqu'à l'atteinte de la rupture où sa valeur chute rapidement par la suite. On identifie trois angles de phase caractéristiques sur la courbe de l'évolution de

l'angle de phase lors de l'essai de fatigue à la figure 5.25, soit l'angle de phase initial ϕ_{50} mesuré suite à 50 cycles de chargement, l'angle de phase à la rupture $\phi_{1/2}$ définie selon la norme ainsi que l'angle de phase à la rupture ϕ_r mesuré l'instant avant que la valeur de l'angle chute suite à la rupture de l'enrobé. En réalité, ϕ_r est mesuré au même nombre de cycles que N_r lorsque ces deux points ne concordent pas exactement.

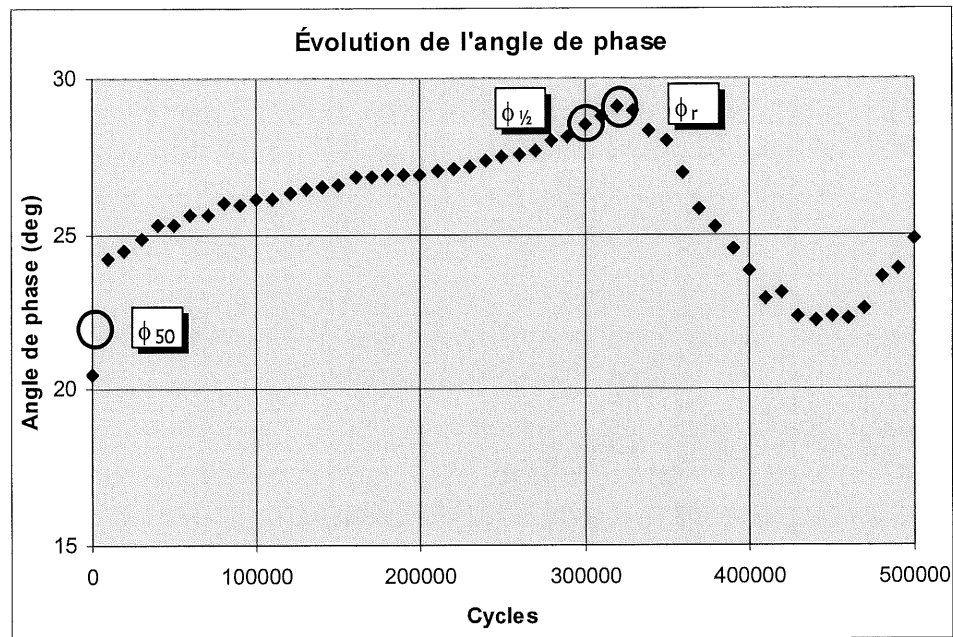


Figure 5.25 – Description de l'évolution de l'angle de phase lors de l'essai de fatigue par ϕ_{50} , $\phi_{1/2}$ et ϕ_r .

En premier lieu, on peut comparer la distribution de $\phi_{1/2}$ avec ϕ_{50} en fonction de la température à la figure 5.26 afin de caractériser l'augmentation de la valeur de l'angle de phase de l'enrobé lors de l'essai de fatigue. On observe que l'écart entre les deux angles semble relativement constant en fonction de la température. Par contre, à la figure 5.27, le rapport $\phi_{1/2}/\phi_{50}$ semble être maximal à environ 5°C. La valeur moyenne des rapports $\phi_{1/2}/\phi_{50}$ obtenus est de 1,23 avec un coefficient de variation de 8 %, ce qui est suffisamment précis pour affirmer que ce rapport est plus faible que le rapport ϕ/ϕ_{50} de 1,33. Ce constat indique que le gain d'angle de phase est au moins aussi important avant les 50 premiers cycles que par la suite, ce qui confirme qu'il y a endommagement de l'enrobé lors des 50 premiers cycles de l'essai de fatigue. Ainsi, il

semble qu'il soit nécessaire d'effectuer les essais de balayage de fréquence de manière à ne pas fausser l'analyse des paramètres initiaux.

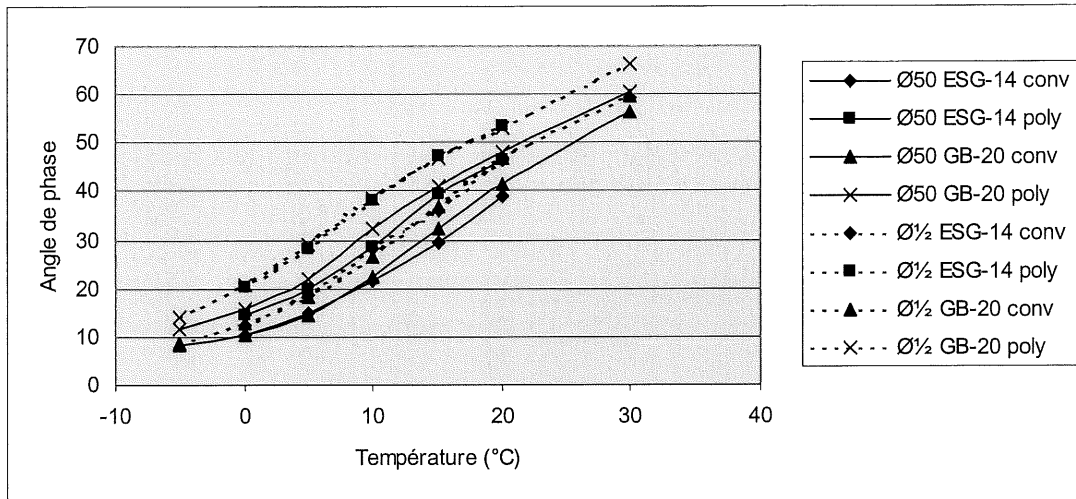


Figure 5.26 – Distribution de $\phi_{1/2}$ et ϕ_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

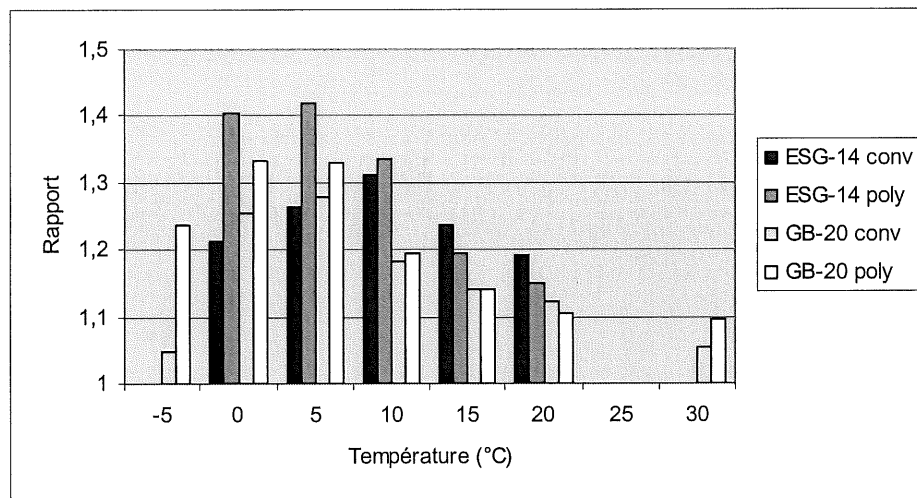


Figure 5.27 – Histogramme des rapports $\phi_{1/2}/\phi_{50}$ en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

En ce qui concerne la relation entre ϕ_r et ϕ_{50} , les observations tirées des figures 5.28 et 5.29 sont identiques aux observations entre $\phi_{1/2}$ et ϕ_{50} puisque les valeurs de $\phi_{1/2}$ et ϕ_r sont pratiquement égales. En effet l'écart entre les deux valeurs à la rupture dépasse rarement 1°.

Ainsi, l'évolution de l'angle de phase lors de l'essai de fatigue semble présenter un gain important au début de l'essai, principalement lors de la période d'échauffement. Par la suite, sa valeur augmente modérément au niveau de la section linéaire de la dégradation par fatigue et chute brusquement à la rupture.

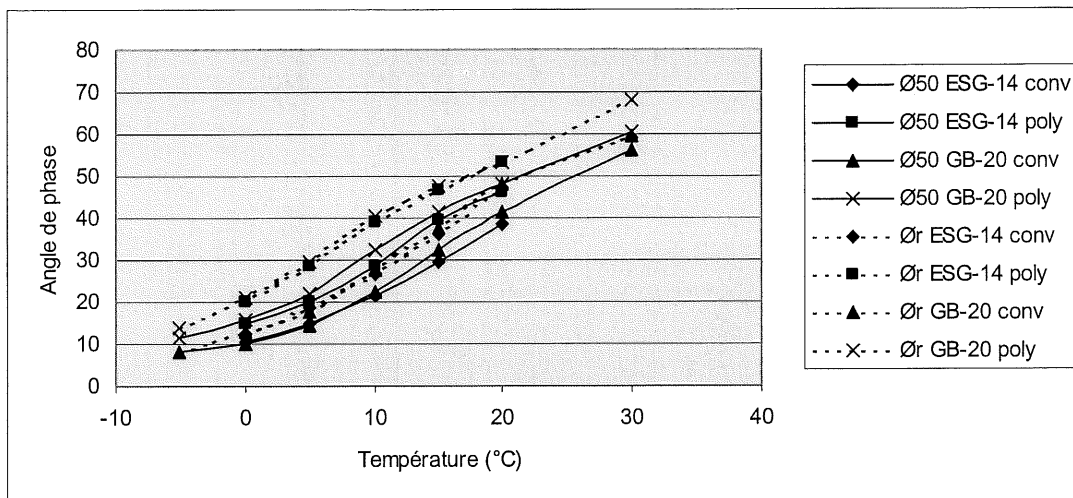


Figure 5.28 – Distribution de ϕ_r et ϕ_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

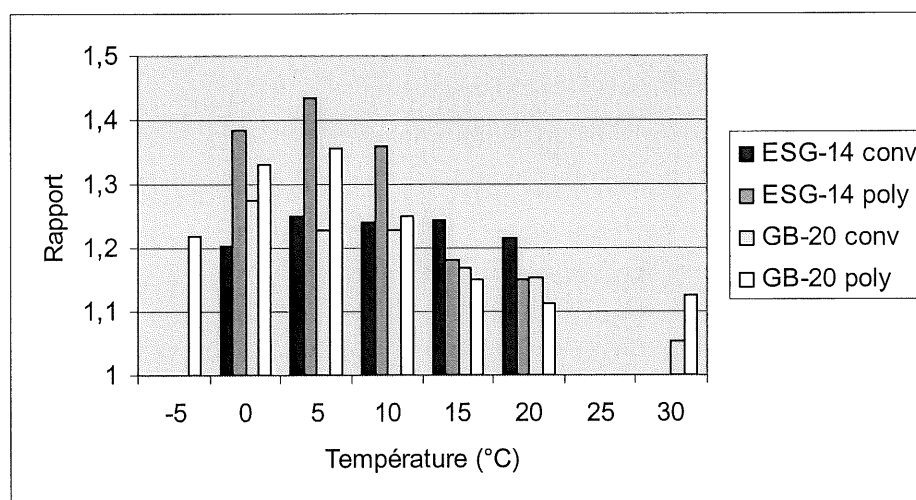


Figure 5.29 – Histogramme des rapports ϕ_r/ϕ_{50} en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

5.5 Caractérisation de la résistance à la fatigue

Plusieurs relations de Whöler ont été caractérisées à différentes températures sur les enrobés de base ESG-14 et GB-20. L'analyse de ces relations a permis d'explorer le processus d'élaboration de modèles généraux en fonction de la température pour prédire la résistance à la fatigue des enrobés. Des essais additionnels à basse température ont été nécessaires pour compléter la discussion à ce sujet. Cette analyse a permis de développer des modèles généraux simples, ou du moins une approche en ce sens.

5.5.1 Équations de fatigue

Une relation de Whöler a été définie pour chaque combinaison de granulométrie, de bitume et de température, ce qui donne 18 équations au total présentées aux tableaux 5.7 à 5.10. Elles sont présentées en deux exemplaires, soit définie selon le critère de rupture de la norme $N_{1/2}$ ou définie selon la définition alternative de la rupture N_r . Le coefficient de détermination R^2 , l'écart-type σ ainsi que le degré de liberté DL de chaque modèle sont également indiqués. Bien que la précision des modèles semble généralement acceptable, leur faible degré de liberté limite la confiance qu'on peut leur porter. Par contre, le modèle pour l'enrobé ESG-14 formulé avec le bitume polymère a été caractérisé à 15°C avec un plus grand nombre d'essai que les autres modèles, ce qui lui donne un degré de liberté de 10. Cette approche ne semble pas augmenter la précision de ce modèle.

Tableau 5.7 – Relations de Whöler en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$) pour l'enrobé ESG-14 formulé avec un bitume conventionnel.

T°C	$N_{1/2}$	R^2	σ	DL	N_r	R^2	σ	DL
5	$N_{1/2} = 1,0 \cdot 10^{17} \varepsilon^{-4,7}$	0,96	0,108	4	$N_r = 4,7 \cdot 10^{16} \varepsilon^{-4,5}$	0,96	0,117	4
10	$N_{1/2} = 3,3 \cdot 10^{16} \varepsilon^{-4,5}$	0,96	0,107	5	$N_r = 4,1 \cdot 10^{16} \varepsilon^{-4,5}$	0,95	0,120	5
15	$N_{1/2} = 2,3 \cdot 10^{15} \varepsilon^{-4,0}$	0,97	0,111	4	$N_r = 8,9 \cdot 10^{14} \varepsilon^{-3,7}$	0,93	0,160	4
20	$N_{1/2} = 1,5 \cdot 10^{16} \varepsilon^{-4,1}$	0,96	0,106	3	$N_r = 1,2 \cdot 10^{17} \varepsilon^{-4,4}$	0,98	0,070	3

**Tableau 5.8 – Relations de Whöler en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$)
pour l'enrobé ESG-14 formulé avec un bitume polymère.**

T°C	$N_{1/2}$	R^2	σ	DL	N_r	R^2	σ	DL
5	$N_{1/2} = 7,8 \cdot 10^{16} \varepsilon^{-4,3}$	0,98	0,083	4	$N_r = 3,2 \cdot 10^{16} \varepsilon^{-4,1}$	0,97	0,102	4
10	$N_{1/2} = 9,1 \cdot 10^{18} \varepsilon^{-4,9}$	0,72	0,352	5	$N_r = 2,2 \cdot 10^{18} \varepsilon^{-4,6}$	0,72	0,341	5
15	$N_{1/2} = 1,1 \cdot 10^{22} \varepsilon^{-5,8}$	0,93	0,147	10	$N_r = 1,6 \cdot 10^{19} \varepsilon^{-4,8}$	0,88	0,165	10
20	$N_{1/2} = 6,6 \cdot 10^{19} \varepsilon^{-4,9}$	0,89	0,132	4	$N_r = 1,7 \cdot 10^{18} \varepsilon^{-4,3}$	0,80	0,163	4

**Tableau 5.9 – Relations de Whöler en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$)
pour l'enrobé GB-20 formulé avec un bitume conventionnel.**

T°C	$N_{1/2}$	R^2	σ	DL	N_r	R^2	σ	DL
5	$N_{1/2} = 5,5 \cdot 10^{16} \varepsilon^{-4,7}$	0,89	0,206	4	$N_r = 4,3 \cdot 10^{16} \varepsilon^{-4,6}$	0,86	0,228	4
10	$N_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{15} \varepsilon^{-4,0}$	0,97	0,093	3	$N_r = 6,6 \cdot 10^{15} \varepsilon^{-4,2}$	0,91	0,159	3
15	$N_{1/2} = 7,9 \cdot 10^{15} \varepsilon^{-4,3}$	0,98	0,113	4	$N_r = 1,3 \cdot 10^{19} \varepsilon^{-5,4}$	0,96	0,167	4
20	$N_{1/2} = 5,2 \cdot 10^{16} \varepsilon^{-4,4}$	0,91	0,169	4	$N_r = 2,5 \cdot 10^{12} \varepsilon^{-2,7}$	0,61	0,259	4
30	$N_{1/2} = 1,1 \cdot 10^{11} \varepsilon^{-2,2}$	0,95	0,071	4	$N_r = 2,1 \cdot 10^{10} \varepsilon^{-2,0}$	0,95	0,064	4

**Tableau 5.10 – Relations de Whöler en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$)
pour l'enrobé GB-20 formulé avec un bitume polymère.**

T°C	$N_{1/2}$	R^2	σ	DL	N_r	R^2	σ	DL
5	$N_{1/2} = 4,0 \cdot 10^{18} \varepsilon^{-5,1}$	0,91	0,236	4	$N_r = 9,1 \cdot 10^{17} \varepsilon^{-4,8}$	0,83	0,313	4
10	$N_{1/2} = 1,1 \cdot 10^{17} \varepsilon^{-4,4}$	0,85	0,237	4	$N_r = 9,3 \cdot 10^{14} \varepsilon^{-3,5}$	0,61	0,361	4
15	$N_{1/2} = 9,3 \cdot 10^{19} \varepsilon^{-5,2}$	0,89	0,176	4	$N_r = 4,6 \cdot 10^{17} \varepsilon^{-4,3}$	0,57	0,367	4
20	$N_{1/2} = 7,4 \cdot 10^{20} \varepsilon^{-5,3}$	0,98	0,096	4	$N_r = 1,3 \cdot 10^{16} \varepsilon^{-3,6}$	0,93	0,124	4
30	$N_{1/2} = 1,9 \cdot 10^{13} \varepsilon^{-2,6}$	0,68	0,024	3	$N_r = 5,8 \cdot 10^{12} \varepsilon^{-2,4}$	0,56	0,185	3

Les relations de Whöler obtenues sont représentées aux figures 5.30 à 5.33 pour les deux définitions de la rupture. Il est important de noter que les points indiqués sur les graphiques servent uniquement à identifier les droites et que les points mesurés se situent entre ces extrémités, soit à environ 35 000 et 350 000 cycles. La véritable représentation des relations de Whöler se retrouve en annexe IV. En premier lieu, on constate sur les représentations que la résistance à la fatigue de l'enrobé augmente avec l'augmentation de la température. Cependant, il semble que pour une température de 5°C, dans le cas où le bitume conventionnel est employé, cette règle ne soit pas respectée. Cette observation est inattendue et une étude particulière à basse température est présentée à la section 5.5.3 pour caractériser ce comportement particulier. On observe également que N_r donne une valeur de résistance à la fatigue plus élevée que $N_{1/2}$. Ce constat a été discuté précédemment à la section 5.3.4 sur l'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue, où il a été identifié que la définition

alternative de la rupture permet une plus grande accumulation de sollicitation par fatigue que le prévoit la norme. Il a également été souligné que la différence entre les deux définitions augmente avec la température, tel qu'on peut l'observer sur la représentation des modèles.

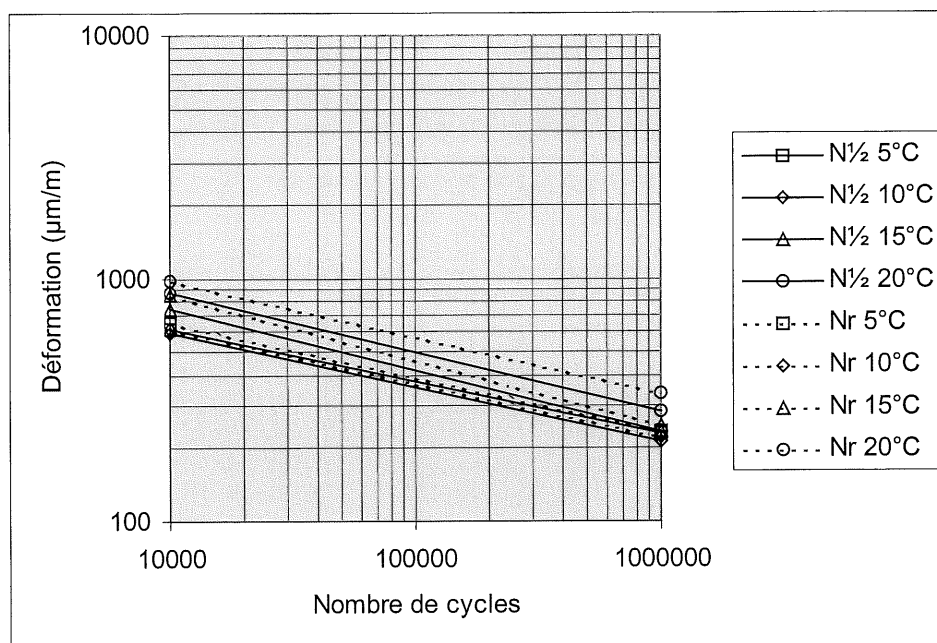


Figure 5.30 – Représentation des relations de Whöler pour l'enrobé ESG-14 formulé avec un bitume conventionnel.

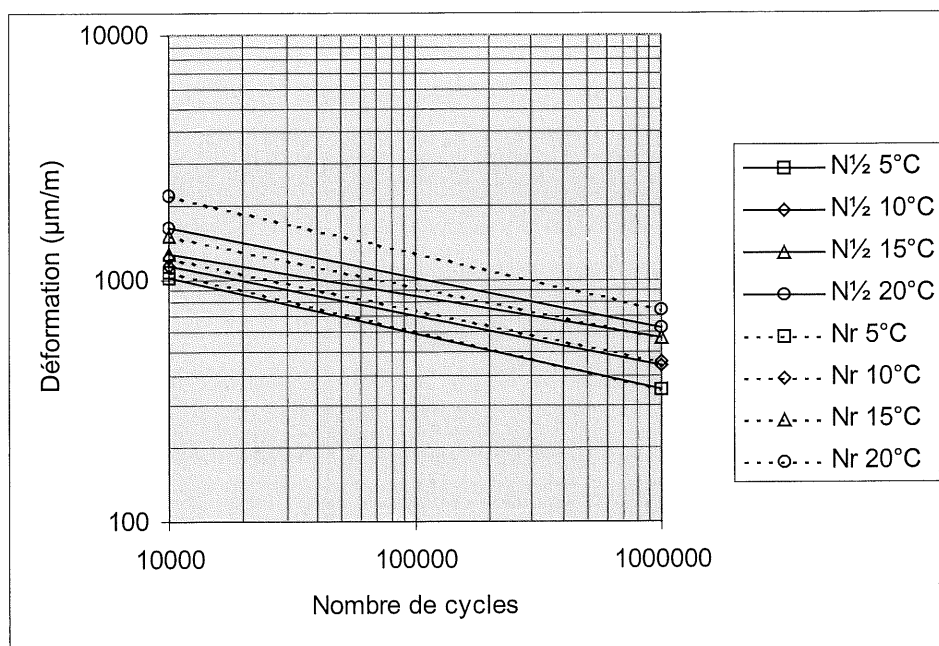


Figure 5.31 – Représentation des relations de Whöler pour l'enrobé ESG-14 formulé avec un bitume polymère.

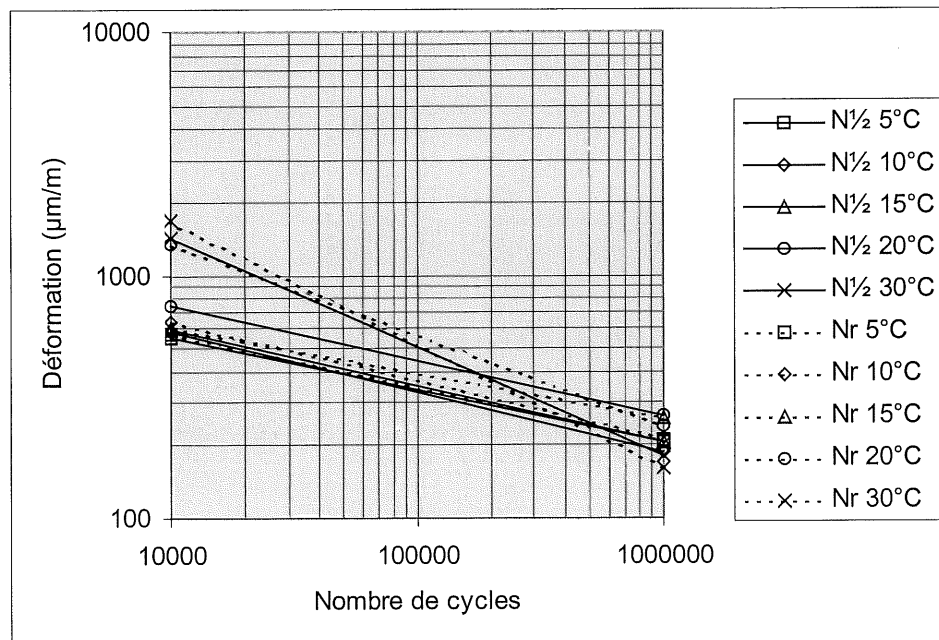


Figure 5.32 – Représentation des relations de Whöler pour l'enrobé GB-20 formulé avec un bitume conventionnel.

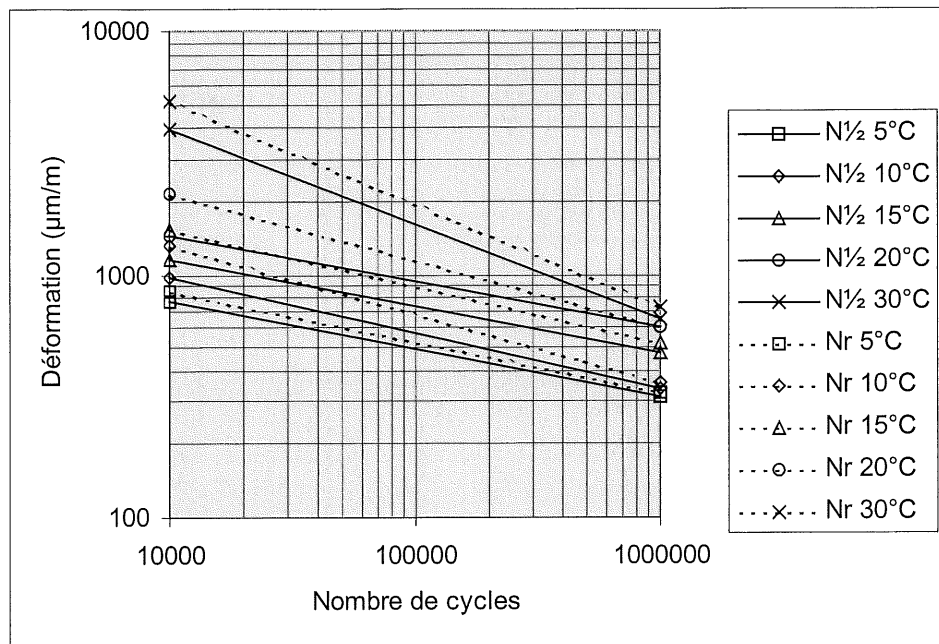


Figure 5.33 – Représentation des relations de Whöler pour l'enrobé GB-20 formulé avec un bitume polymère.

La figure 5.34 montre la distribution des pentes des droites de fatigue en fonction de la température. Cette distribution semble relativement constante bien que les droites se croisent parfois sur les figures 5.30 à 5.33. La pente varie surtout à 30°C où elle semble plus faible en valeur absolue que ses homologues. Ce constat semble indiquer que l'augmentation de la température diminue l'influence du niveau de déformation sur la résistance à la fatigue de l'enrobé. Ainsi, il ne semble pas y avoir de relation entre la température et la pente de la droite de fatigue pour chacun des enrobés quelle que soit la définition de la rupture, sauf à haute température. Ce constat indique que l'emploi d'une pente moyenne pour le développement de modèles généraux semble envisageable si l'on demeure à l'intérieur d'une certaine plage de température et de fréquence.

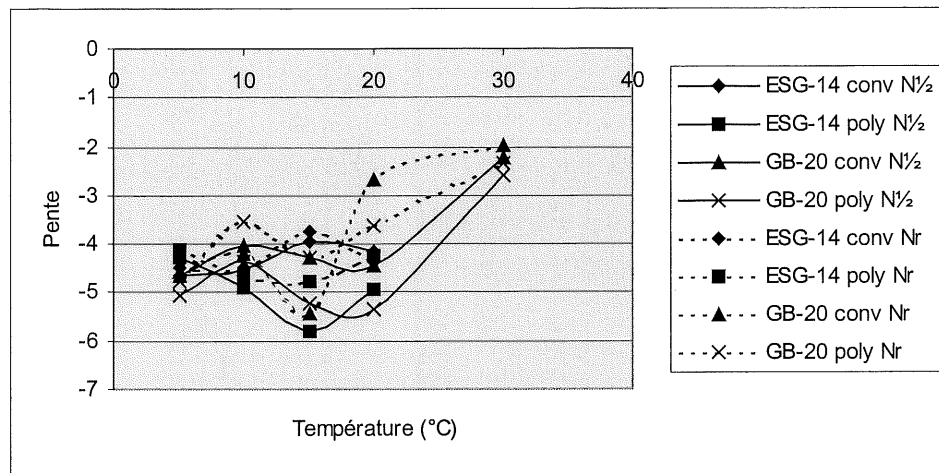


Figure 5.34 - Distribution de la pente des relations de Whöler en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

La moyenne des pentes a été déterminée au tableau 5.11 sur une plage de températures intermédiaires de 5 à 20°C. Les valeurs d'écart-type σ et de coefficient de variation CV sont également indiquées. Bien que certaines valeurs de pentes semblent variables, tel qu'on le constate pour l'enrobé GB-20 formulé avec le bitume conventionnel, on observe qu'il est possible d'établir une valeur de pente moyenne qui représente bien l'ensemble des relations. Ainsi, la pente moyenne des relations $N_{1/2}$ est de $-4,7$ et des relations N_r est de $-4,3$. Ces deux valeurs de pente moyennes ont été calculées à partir de l'ensemble des valeurs de pentes obtenues et présentent un coefficient de variation inférieur à 15 %, ce qui semble acceptable.

Tableau 5.11 – Valeur de pente moyenne pour les relations de Whöler des enrobés ESG-14 et GB-20.

	$N_{1/2}$			N_r		
	pente	σ	% CV	pente	σ	% CV
ESG-14 conv	-4,3	0,286	6,7	-4,3	0,334	7,8
ESG-14 poly	-5,0	0,536	10,7	-4,5	0,269	6,1
GB-20 conv	-4,4	0,250	5,7	-4,2	0,981	23,2
GB-20 poly	-5,0	0,354	7,1	-4,1	0,532	13,1
Moyenne	-4,7	0,495	10,6	-4,3	0,614	14,5

Influencées par la distribution des pentes, les ordonnées à l'origine des différentes droites ont tendance à se distribuer de façon aléatoire en fonction de la température comme on le constate à la figure 5.35. Entre autres, on constate que la valeur de l'ordonnée à l'origine est plus faible

à 30°C, ce qui est directement attribuable à la valeur de la pente. L'utilisation d'une pente moyenne pourrait permettre d'uniformiser la distribution des ordonnées afin de mieux caractériser l'influence de la température sur le comportement de l'enrobé.

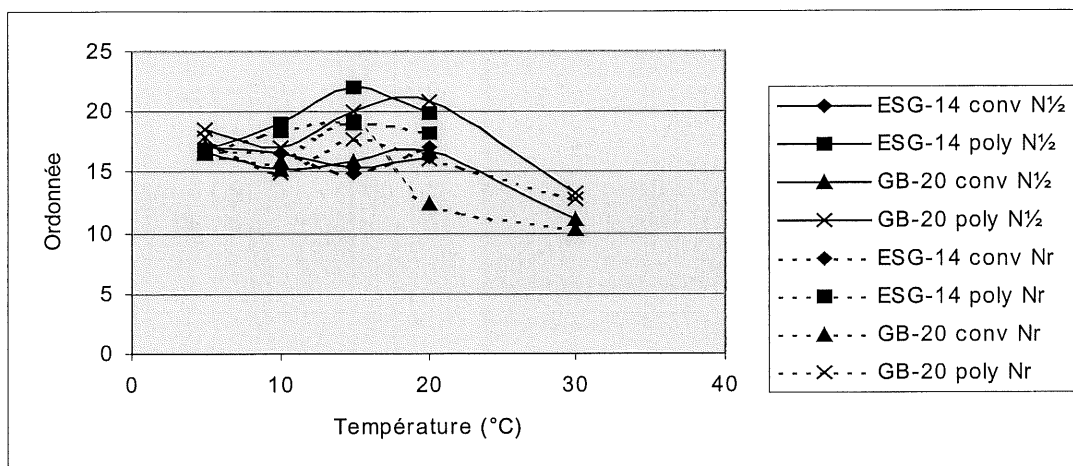


Figure 5.35 - Distribution de l'ordonnée à l'origine des relations de Whöler en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

Afin de mieux apprécier la résistance à la fatigue de chacun des enrobés, on peut tenter de classer les relations de Whöler. Par exemple, il est possible de déterminer la déformation nécessaire ϵ_6 pour que l'enrobé se rupture suite à 1 million (10^6) de cycles de chargement. Ce paramètre est employé par le LCPC pour la conception de leur chaussée avec une température de 10°C et une fréquence de 25 Hz. Une valeur de ϵ_6 élevée indique que la résistance à la fatigue de l'enrobé est bonne puisque pour atteindre la rupture à un nombre de cycles fixe, on doit appliquer une déformation importante. Ce paramètre est intéressant puisqu'il permet de comparer les enrobés à des niveaux de déformation qui se rapprochent de ceux que l'on retrouve sur la route.

Les tableaux 5.12 et 5.13 présentent, pour chaque définition de la rupture, la valeur de ϵ_6 pour les différents types d'enrobé en fonction de la température. Les valeurs d'écart-type σ et de coefficient de variation CV associées à cette valeur sont également présentées. La précision des ϵ_6 semble acceptable puisque le CV est généralement inférieur à 5 %. Par contre, cette

précision est déterminée pour les valeurs logarithmiques de ε_6 et lorsque l'on travaille avec des valeurs arithmétiques l'erreur peut prendre une importance beaucoup plus grande. La figure 5.36 présente la distribution des valeurs de ε_6 en fonction de la température. On fait essentiellement les mêmes constatations sur le comportement de l'enrobé qu'avec les figures 5.30 à 5.33. La résistance à la fatigue augmente avec l'augmentation de la température à l'exception des enrobés formulés avec le bitume conventionnel à 5 et 30°C dont la résistance semble évoluer en sens inverse. Tel que discuté précédemment, il s'agit d'un comportement atypique de l'enrobé dont l'on discutera à la section 5.5.3 sur la caractérisation à basse température. On constate également que les enrobés formulés avec le bitume polymère résistent mieux à la fatigue alors que l'influence de la granulométrie est moins marquée.

Tableau 5.12 – Valeurs de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$) estimées par $N_{1/2}$ pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

T°C	ESG-14 conv			ESG-14 poly			GB-20 conv			GB-20 poly		
	ε_6	σ	% CV	ε_6	σ	% CV	ε_6	σ	% CV	ε_6	σ	% CV
5	230	0,140	2,3	347	0,112	1,9	204	0,283	4,7	314	0,325	5,4
10	214	0,138	2,3	442	0,439	7,3	186	0,142	2,4	336	0,373	6,2
15	233	0,138	2,3	572	0,170	2,8	204	0,146	2,4	474	0,276	4,6
20	285	0,164	2,7	634	0,219	3,7	264	0,251	4,2	611	0,122	2,0
30							179	0,146	2,4	664	0,194	3,2

Tableau 5.13 – Valeurs de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$) estimées par N_r pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

T°C	ESG-14 conv			ESG-14 poly			GB-20 conv			GB-20 poly		
	ε_6	σ	% CV	ε_6	σ	% CV	ε_6	σ	% CV	ε_6	σ	% CV
5	233	0,151	2,5	351	0,138	2,3	208	0,312	5,2	321	0,428	7,1
10	221	0,153	2,6	455	0,416	6,9	214	0,222	3,7	351	0,550	9,2
15	249	0,193	3,2	574	0,189	3,2	259	0,199	3,3	525	0,513	8,6
20	338	0,094	1,6	746	0,214	3,6	240	0,424	7,1	606	0,151	2,5
30							160	0,142	2,4	732	0,217	3,6

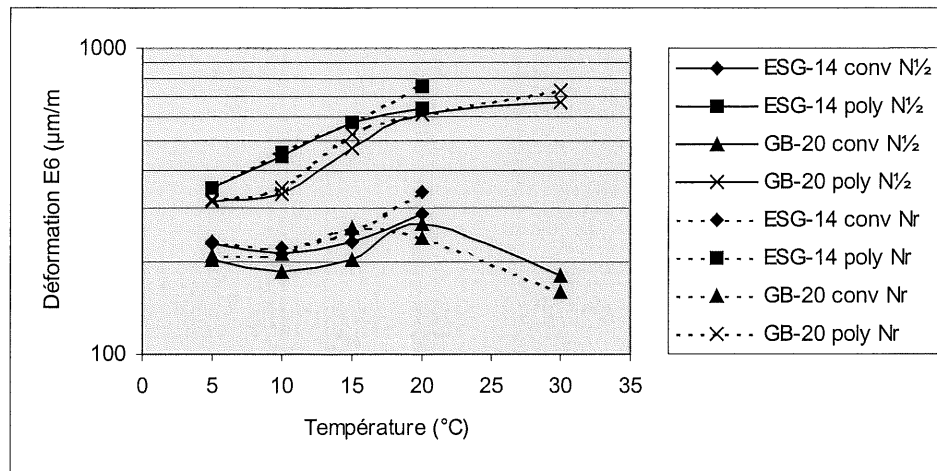


Figure 5.36 - Distribution de ε_6 en fonction de la température pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

5.5.2 Essais supplémentaires à basse température

Afin de compléter l'analyse de l'influence de la température sur la résistance à la fatigue des enrobés, une caractérisation à basse température a été ajoutée au programme d'essai original. Les essais additionnels ont été effectués à basse température parce que la poutre d'enrobé tend à fluer lorsque la température est de 30°C ou plus, ce qui complique les manipulations et affecte les résultats. Ainsi, des essais ont été effectués à des températures inférieures à 5°C avec un niveau de déformation fixe sélectionné en fonction du type d'enrobé. La figure 5.37 montre les résultats obtenus pour l'enrobé ESG-14 avec les deux définitions de la rupture. La figure 5.38 montre les résultats pour l'enrobé GB-20. Pour obtenir la résistance à la fatigue des enrobés pour des températures de 5°C et plus, il suffit d'employer les équations de fatigue disponibles aux tableaux 5.7 et 5.10.

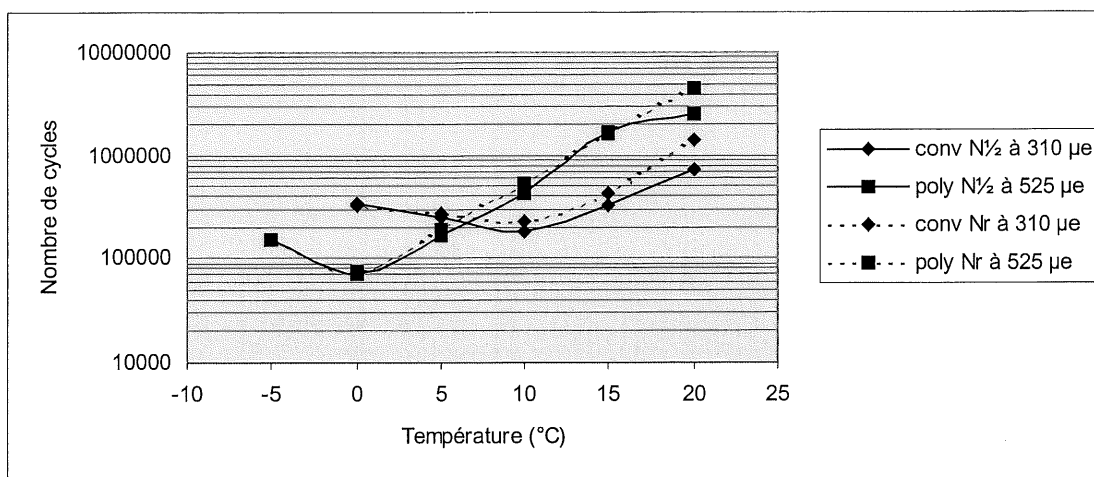


Figure 5.37 - Distribution du nombre de cycles pour un niveau de déformation fixe en fonction de la température pour les enrobés EGS-14.

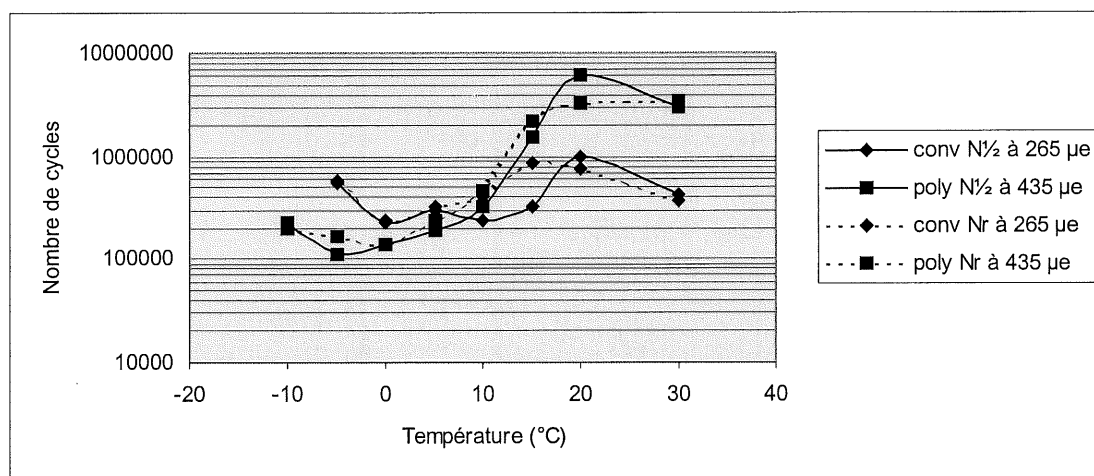


Figure 5.38 - Distribution du nombre de cycles pour un niveau de déformation fixe en fonction de la température pour les enrobés GB-20.

On constate qu'il y a effectivement un léger gain de résistance à la fatigue à basse température. Le gain est identifiable pour des températures de -5°C et moins pour tous les enrobés quel que soit le type de bitume. Dans le cas de l'enrobé ESG-14 formulé avec le bitume conventionnel, le gain est déjà identifiable à une température de 5°C . Cette étude n'est que très sommaire et il est difficile d'extrapoler le comportement pour des températures inférieures à celles étudiées. Par ailleurs, on reconnaît qu'il y a un comportement particulier à basse température, ce qui limite l'extrapolation des modèles définis pour une plage de températures intermédiaires. On

devine également un comportement similaire à haute température où la résistance à la fatigue diminue dans le cas des essais effectués à 30°C. Ainsi, il semble exister une plage limitée de température où le comportement de l'enrobé est conforme au comportement anticipé. À l'extérieur de cette plage, la résistance à la fatigue de l'enrobé semble évoluer en sens inverse. Bien qu'il soit difficile d'expliquer ce phénomène, ces résultats confirment l'importance d'employer les modèles uniquement sur les plages de température et de fréquence pour lesquelles ils ont été développés.

Une explication plausible du changement de comportement observé à haute et à basse température est vraisemblablement un changement des propriétés du bitume à basse température et une augmentation du rôle du squelette granulaire à haute température. Les informations disponibles ne permettent pas de valider ces hypothèses qui pourraient faire l'objet d'une étude en soi. Ces pistes de réflexion ne seront pas étudiées dans le cadre de ce projet.

5.5.3 Modèles de fatigue généraux

L'objectif ultime de caractériser la résistance à la fatigue des enrobés est de disposer de modèles fiables pour la conception des chaussées. Dans le cadre de cette étude, il est possible de développer des modèles généraux simples à partir des relations de Whöler disponibles aux tableaux 5.7 à 5.10. Les modèles généraux proposés dans cette section sont développés pour une plage de température de 5 à 20°C et une fréquence de 10 Hz. Bien que certains enrobés présentent un comportement particulier à 5°C, cette température a été conservée pour établir les modèles puisqu'il semble s'agir probablement de la température critique pour les pays nordiques [Myre 1992]. Aux tableaux 5.14 et 5.15, on retrouve des modèles généraux présentés sous la forme de la relation de Whöler pour les deux définitions de la rupture. Ces modèles ont été développés en fonction du type d'enrobé, du type de granulométrie et de bitume. On y retrouve également un modèle général pour représenter l'ensemble des résultats obtenus. L'ordonnée est de préférence exprimée en fonction de la température par une relation généralement quadratique pour tenir compte du gain de résistance à 5°C dans le cas des enrobés formulés avec le bitume conventionnel.

Tableau 5.14 – Modèles de fatigue $N_{1/2}$ en fonction de la déformation ϵ ($\mu\text{m/m}$) et de la température T ($^{\circ}\text{C}$) pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

Type d'enrobé	Modèle	R^2	σ	DL
ESG-14 conv	$N_{1/2} = \epsilon^{-4,30} 10^{(16,3 - 0,083 T + 0,005 T^2)}$	0,95	0,111	20
ESG-14 poly	$N_{1/2} = \epsilon^{-5,07} 10^{(18,5 + 0,086 T)}$	0,85	0,199	28
GB-20 conv	$N_{1/2} = \epsilon^{-4,45} 10^{(16,6 - 0,096 T + 0,005 T^2)}$	0,93	0,146	19
GB-20 poly	$N_{1/2} = \epsilon^{-4,94} 10^{(17,7 + 0,098 T)}$	0,89	0,194	21
ESG-14	$N_{1/2} = \epsilon^{-2,81} 10^{(8,29 + 0,593 T - 0,018 T^2)}$	0,50	0,909	51
GB-20	$N_{1/2} = \epsilon^{-1,87} 10^{(9,86 - 0,026 T + 0,002 T^2)}$	0,45	0,411	42
Conventionnel	$N_{1/2} = \epsilon^{-4,32} 10^{(16,3 - 0,082 T + 0,005 T^2)}$	0,90	0,165	43
Polymère	$N_{1/2} = \epsilon^{-5,00} 10^{(18,2 + 0,080 T + 0,001 T^2)}$	0,79	0,253	51
Général	$N_{1/2} = \epsilon^{-1,60} 10^{(9,06 + 0,028 T - 0,0002 T^2)}$	0,32	0,437	98

Tableau 5.15 – Modèles de fatigue N_r en fonction de la déformation ϵ ($\mu\text{m/m}$) et de la température T ($^{\circ}\text{C}$) pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

Type d'enrobé	Modèle	R^2	σ	DL
ESG-14 conv	$N_r = \epsilon^{-4,22} 10^{(16,2 - 0,096 T + 0,0060 T^2)}$	0,94	0,122	20
ESG-14 poly	$N_r = \epsilon^{-4,50} 10^{(16,9 + 0,101 T)}$	0,82	0,207	28
GB-20 conv	$N_r = \epsilon^{-4,32} 10^{(16,1 - 0,066 T + 0,005 T^2)}$	0,85	0,213	19
GB-20 poly	$N_r = \epsilon^{-4,15} 10^{(15,7 + 0,100 T)}$	0,77	0,274	21
ESG-14	$N_r = \epsilon^{-1,62} 10^{(7,84 + 0,217 T - 0,005 T^2)}$	0,46	0,486	51
GB-20	$N_r = \epsilon^{-1,48} 10^{(8,61 + 0,041 T + 0,0001 T^2)}$	0,35	0,438	42
Conventionnel	$N_r = \epsilon^{-4,23} 10^{(16,0 - 0,076 T + 0,005 T^2)}$	0,87	0,183	43
Polymère	$N_r = \epsilon^{-4,31} 10^{(16,3 + 0,094 T + 0,001 T^2)}$	0,76	0,257	51
Général	$N_r = \epsilon^{-1,30} 10^{(8,26 + 0,043 T - 0,0002 T^2)}$	0,27	0,432	98

En premier lieu, on constate que les quatre modèles développés par type d'enrobé présentent généralement une meilleure précision. On observe que la précision est légèrement plus faible dans le cas de N_r , ce qui est prévisible puisque sa définition est influencée par un plus grand nombre de variables que la définition de $N_{1/2}$. Par ailleurs, la précision de N_r demeure acceptable si l'on considère que sa définition constitue un modèle plus fidèle à la réalité de l'essai de fatigue. On remarque également la grande influence du type de bitume sur la définition des modèles. En effet, si l'on ne tient pas compte du type de bitume employé pour la caractérisation, on obtient une précision pratiquement nulle des modèles, tel qu'on le constate pour les modèles développés en fonction du type de granulométrie et le modèle général. De plus, ces modèles présentent une valeur de pente très différente des relations de Whöler que l'on cherche à représenter, ce qui semble un indicateur de la piètre représentativité de ces

modèles. L'examen des tableaux 5.7 à 5.10 permet d'observer que la pente des relations de Whöler caractérisées dans le cadre de cette étude se situe entre -4 et -5 .

Souvent, au lieu de caractériser les modèles en fonction de la température, on préfère les caractériser en fonction de la rigidité de l'enrobé. Dans ce cas, il faut sélectionner la définition de la rigidité que l'on désire inclure dans le modèle. De manière logique et pratique, il est préférable d'employer la valeur du module dynamique linéaire E puisqu'il s'agit vraisemblablement de la valeur de rigidité que l'on désire employer pour la conception et qu'elle est simple à caractériser par l'essai de balayage de fréquence. Dans le cadre de cette étude, cette valeur n'est pas disponible pour l'enrobé ESG-14. Ainsi, les modèles ont été développés uniquement pour l'enrobé GB-20, ce qui permet tout de même de juger de la validité de l'approche. La valeur de la rigidité est introduite dans le modèle sous sa forme logarithmique pour les deux définitions de la rupture aux tableaux 5.16 et 5.17, une approche inspirée des modèles présentés à la section 2.10.2. On observe que la précision de ces modèles est pratiquement identique à la précision des modèles présentés précédemment en fonction de la température. Ce constat était prévisible puisque pour chaque température il existe une valeur de module dynamique E unique.

Tableau 5.16 – Modèles de fatigue $N_{1/2}$ en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$) et de la rigidité E (MPa) pour les enrobés GB-20.

Type d'enrobé	Modèle	R^2	σ	DL
GB-20 conv	$N_{1/2} = 9,2 \cdot 10^{21} \varepsilon^{-4,23} E^{-1,61}$	0,89	0,174	20
GB-20 poly	$N_{1/2} = 3,5 \cdot 10^{29} \varepsilon^{-4,94} E^{-2,92}$	0,90	0,184	21
GB-20	$N_{1/2} = 6,8 \cdot 10^{21} \varepsilon^{-3,10} E^{-2,29}$	0,67	0,317	44

Tableau 5.17 – Modèles de fatigue N_r en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$) et de la rigidité E (MPa) pour les enrobés GB-20.

Type d'enrobé	Modèle	R^2	σ	DL
GB-20 conv	$N_r = 1,9 \cdot 10^{24} \varepsilon^{-4,16} E^{-2,21}$	0,84	0,218	20
GB-20 poly	$N_r = 1,3 \cdot 10^{27} \varepsilon^{-4,05} E^{-2,88}$	0,73	0,293	21
GB-20	$N_r = 1,8 \cdot 10^{22} \varepsilon^{-2,81} E^{-2,55}$	0,60	0,340	44

5.6 Recommandations

La caractérisation des enrobés de base ESG-14 et GB-20 avait pour objectif premier de définir l'approche pour la caractérisation de la rigidité et de la résistance à la fatigue des enrobés. Pour atteindre cet objectif, des essais de balayage de fréquence et de fatigue ont été effectués afin de se familiariser avec ces méthodes de caractérisation. De plus, l'influence de la température sur le comportement de l'enrobé a été largement étudiée. En ce qui concerne la granulométrie et le type de bitume, plus de deux catégories par facteur auraient été nécessaires pour véritablement analyser leur influence.

5.6.1 Rigidité et angle de phase

En ce qui concerne la rigidité et l'angle de phase, il est recommandé d'employer l'essai de balayage de fréquence pour caractériser leur valeur avant endommagement, soit la rigidité maximale et l'angle de phase minimal de l'enrobé sur une plage de température et de fréquence. La combinaison de ces paramètres permet de caractériser le module complexe de l'enrobé que l'on peut représenter par la courbe de Black. En extrapollant cette courbe, il est possible de déterminer la valeur du module élastique de l'enrobé, valeur de rigidité correspondant à un angle de phase nul. La valeur du module élastique de l'enrobé GB-20 est d'environ 15 800 MPa. La courbe de Black a également permis de déterminer que la cassure dans l'évolution de l'angle de phase en fonction de la température n'était pas atteinte à 20°C et 1 Hz, ce qui signifie que le bitume assume encore son rôle à cette combinaison de température et de fréquence.

Les valeurs types de rigidité et d'angle de phase pour l'enrobé GB-20 sont présentées au tableau 5.18 pour des températures de 5 et 15°C avec une fréquence de chargement de 10 Hz. Ces températures sont pour le moment envisagées comme la température critique et la température effective pour l'endommagement par fatigue au Québec. Une discussion à ce sujet est prévue au chapitre 6. On constate que l'enrobé formulé avec le bitume polymère présente une rigidité plus faible et un angle de phase plus élevé. Les résultats sur l'enrobé ESG-14 ont démontré que le type de bitume employé a une plus grande influence sur ces valeurs que le

type de granulométrie. De même, on constate que la température a une grande influence sur la rigidité et l'angle de phase de l'enrobé.

Tableau 5.18 – Valeurs de rigidité E (MPa) et d'angle de phase ϕ (°) mesurées à 5 et 15°C et 10 Hz pour les enrobés GB-20.

Type d'enrobé	5°C		15°C	
	E (MPa)	ϕ (°)	E (MPa)	ϕ (°)
GB-20 conventionnel	9 840	11,9°	6 530	23,3°
GB-20 polymère	7 240	17,8°	3 790	31,4°

Un rappel des modèles de rigidité proposés pour la conception avec un enrobé GB-20 est présenté au tableau 5.19. Il s'agit des modèles présentés au tableau 5.5 en fonction du type de bitume. Ces modèles présentent le logarithme de la rigidité E en fonction de la température T et du logarithme de la fréquence fr. Il s'agit d'une forme classique de ce type d'équation. Le coefficient de détermination R^2 , l'écart type σ et le degré de liberté DL des équations sont également indiqués. Les deux types de bitume n'ont pas été mis ensemble dans un modèle général puisque le paramètre pour considérer leur influence est inconnu. De plus, l'enrobé GB-20 formulé avec du bitume polymère n'a jamais été posé au Québec ce qui rend inutile l'unification des deux modèles. Les modèles présentés sont valides uniquement pour une plage de température de 5 à 20°C et une plage de fréquence de 1 à 30 Hz.

Tableau 5.19 – Modèle de rigidité E (MPa) en fonction de la température T (°C) et de la fréquence fr (Hz) pour les enrobés GB-20.

Type d'enrobé	Modèle	R^2	σ	DL
GB-20 conventionnel	$E = 10^{(3,97 - 0,031 T)} fr^{0,199}$	0,94	0,055	45
GB-20 polymère	$E = 10^{(3,81 - 0,038 T)} fr^{0,269}$	0,96	0,056	45

5.6.2 Résistance à la fatigue

Un autre aspect important de la caractérisation de la rigidité et de l'angle de phase est l'étude de leur évolution lors de l'essai de fatigue. Cette étude a permis de développer des définitions alternatives pour la caractérisation de la rupture et de la rigidité initiale de l'essai de fatigue, en remplacement des critères empiriques proposés par la norme.

La définition alternative de la rupture N_r se définit par le point d'inflexion suite à la section linéaire de la courbe de l'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue. Ce point concorde avec la chute de l'angle de phase, ce qui indique qu'il y a effectivement un changement d'état de l'enrobé qui peut être associé à la rupture. Le point de rupture N_r se produit généralement à la suite d'un plus grand nombre de cycles que le point de rupture conventionnel $N_{1/2}$. Cet écart augmente avec l'augmentation de la température dû à l'augmentation de l'effet de la période d'échauffement au début de l'essai. Ainsi, si l'on désire caractériser uniquement la résistance à la fatigue de l'enrobé, il est recommandé d'envisager l'utilisation de N_r . De même, il a été défini que la rigidité initiale de l'essai de fatigue S_0 devait être mesurée suite à la période d'échauffement du début de l'essai, en extrapolant la section stable de l'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue. De cette façon, on se trouve à isoler la section d'endommagement strictement par fatigue. D'ailleurs, le rapport entre la rigidité initiale alternative S_0 et la rigidité à la rupture alternative S_r semble être constant avec une valeur d'environ 45%. Si l'on désire employer ces définitions alternatives, il est recommandé de caractériser également les définitions conventionnelles de manière à conserver un lien avec les autres agences qui développent des modèles de fatigue.

Pour la conception des chaussées, il est pratique de disposer de modèles généraux qui décrivent la résistance à la fatigue de différents types d'enrobés pour différentes conditions de sollicitation. Ces modèles sont développés à partir des relations de Whöler individuelles qui caractérisent le comportement d'un enrobé pour des conditions de sollicitation précises. Les tableaux 5.20 et 5.21 présentent un rappel des modèles généraux développés pour chaque type d'enrobé en fonction de la température sur une plage de 5 à 20°C tel qu'on les retrouve aux tableaux 5.14 et 5.15. Ces modèles sont présentés pour la définition de la rupture selon la norme $N_{1/2}$ et la définition alternative de la rupture N_r . On retrouve également des modèles généraux pour l'enrobé GB-20 en fonction de la rigidité pour la même plage de température tel que décrit aux tableaux 5.16 et 5.17. Le coefficient de détermination R^2 , l'écart type σ et le degré de liberté DL de l'équation sont également indiqués. Bien que les relations avec N_r présentent une précision légèrement inférieure aux modèles $N_{1/2}$, on recommande tout de même de considérer cette approche puisqu'elle semble plus près de la réalité de l'essai de fatigue.

Tableau 5.20 – Modèles de fatigue $N_{1/2}$ en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$), de la température T ($^{\circ}\text{C}$) ou de la rigidité E (MPa) pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

Type d'enrobé	Modèle	R^2	σ	DL
ESG-14 conv	$N_{1/2} = 10^{(16,3 - 0,083 T + 0,005 T^2)} \varepsilon^{-4,30}$	0,95	0,111	20
ESG-14 poly	$N_{1/2} = 10^{(18,5 + 0,086 T)} \varepsilon^{-5,07}$	0,85	0,199	28
GB-20 conv	$N_{1/2} = 10^{(16,6 - 0,096 T + 0,005 T^2)} \varepsilon^{-4,45}$	0,93	0,146	19
	$N_{1/2} = 9,2 \cdot 10^{21} \varepsilon^{-4,23} E^{-1,61}$	0,89	0,174	20
GB-20 poly	$N_{1/2} = 10^{(17,7 + 0,098 T)} \varepsilon^{-4,94}$	0,89	0,194	21
	$N_{1/2} = 3,5 \cdot 10^{29} \varepsilon^{-4,94} E^{-2,92}$	0,90	0,184	21

Tableau 5.21 – Modèles de fatigue N_r en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$), de la température T ($^{\circ}\text{C}$) ou de la rigidité E (MPa) pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

Type d'enrobé	Modèle	R^2	σ	DL
ESG-14 conv	$N_r = 10^{(16,2 - 0,096 T + 0,0060 T^2)} \varepsilon^{-4,22}$	0,94	0,122	20
ESG-14 poly	$N_r = 10^{(16,9 + 0,101 T)} \varepsilon^{-4,50}$	0,82	0,207	28
GB-20 conv	$N_r = 10^{(16,1 - 0,066 T + 0,005 T^2)} \varepsilon^{-4,32}$	0,85	0,213	19
	$N_r = 1,9 \cdot 10^{24} \varepsilon^{-4,16} E^{-2,21}$	0,84	0,218	20
GB-20 poly	$N_r = 10^{(15,7 + 0,100 T)} \varepsilon^{-4,15}$	0,77	0,274	21
	$N_r = 1,3 \cdot 10^{27} \varepsilon^{-4,05} E^{-2,88}$	0,73	0,293	21

Dans le cadre de cette étude, il ne semble pas possible de développer des modèles plus généraux que ceux présentés en conservant un niveau de précision acceptable. Pour le développement de modèles généraux de fatigue, il est recommandé de viser une valeur de pente similaire aux relations de Whöler individuelles que l'on cherche à décrire. Il semble que la valeur de la pente soit un indicateur de la validité d'un tel modèle. Dans le cadre de cette étude, la pente moyenne des relations de Whöler est d'environ $-4,5$, ce qui semble respecté au niveau des modèles généraux des tableaux 5.20 et 5.21. Lorsque l'on combine les équations générales entre elles, on s'éloigne sensiblement de la valeur de pente moyenne et la précision diminue, ce qui semble indiquer qu'il manque certains paramètres à l'équation pour caractériser adéquatement la situation.

Finalement, on retrouve au tableau 5.22 les valeurs de ε_6 ainsi que l'écart type σ associé à leur estimation. On constate que les enrobés formulés avec un bitume polymère semblent mieux résister à la fatigue alors que l'influence de la granulométrie est peu marquée. Le paramètre ε_6 s'est avéré un critère valable dans le cadre de cette étude pour le simple classement des

relations de Whöler. On constate également que l'écart entre les valeurs déterminées par $N_{1/2}$ et N_r est pratiquement inexistant, ce qui semble indiquer que le passage d'une définition de la rupture à l'autre est envisageable sans compromettre l'utilisation du paramètre ε_6 .

Tableau 5.22 – Valeurs de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$) estimées à 5 et 15°C et 10 Hz pour les enrobés ESG-14 et GB-20.

Type d'enrobé	$N_{1/2}$		N_r	
	5°C	15°C	5°C	15°C
ESG-14 conventionnel	230	233	233	249
ESG-14 polymère	347	572	351	574
GB-20 conventionnel	204	204	208	259
GB-20 polymère	314	474	321	525

5.6.3 Influence de la température

La caractérisation de l'influence de la température sur la rigidité et l'angle de phase de l'enrobé ont permis de reproduire leur distribution en fonction de ce paramètre. La rigidité diminue avec l'augmentation de la température ou la diminution de la fréquence alors que l'angle de phase augmente avec l'augmentation de la température ou la diminution de la fréquence.

D'autre part, la caractérisation de la résistance à la fatigue de l'enrobé en fonction de la température a permis d'observer un comportement inattendu, soit un gain de résistance à la fatigue à basse température et une perte de résistance à la fatigue à haute température. Ce comportement a été clairement identifié pour les enrobés formulés avec un bitume conventionnel et semble s'appliquer également aux enrobés formulés avec un bitume polymère. Pour le bitume conventionnel, le gain de résistance a été identifié à une température aussi élevée que 5°C et on observe une perte importante de résistance à la fatigue à 30°C. Il semble important de tenir compte de cette évolution de la résistance à la fatigue en fonction de la température puisque les températures où ce changement de comportement se produit sont généralement considérées dans les études de fatigue. En ce qui concerne l'utilisation du bitume polymère, la plage de températures intermédiaires où le comportement est considéré normal semble plus grande.

6. CARACTERISATION DES ENROBES MB-16 DE L'AUTOROUTE 10

Un site expérimental de suivi de performance a été construit en 1992 sur l'autoroute 10. Les données accumulées sur la fissuration dans les traces de roue permettent de classer les enrobés en fonction de leur résistance à la fatigue. Dans le cadre de cette étude, l'essai de flexion aux tiers points a été employé pour caractériser la rigidité, l'angle de phase et la résistance à la fatigue des enrobés que l'on retrouve sur le site. Les résultats obtenus en laboratoire ont été comparés à la performance observée sur le site afin d'évaluer le potentiel de cet essai pour le classement des enrobés en fonction de leur résistance à la fatigue. L'analyse consiste principalement à caractériser l'influence du type de bitume puisqu'il s'agit du seul paramètre qui varie sur les différentes sections du site expérimental.

6.1 Description du site

La chaussée sélectionnée pour cette étude est un site expérimental du programme stratégique canadien de recherche routière C-SHRP construit en 1992 sur l'autoroute 10 à son extrémité est, en banlieue de la ville de Sherbrooke. Le site est divisé en quatre planches distinctes qui ont une structure identique mais dont l'enrobé, d'une granulométrie unique, a été formulé avec quatre bitumes différents. Les bitumes employés sont de type conventionnel avec une pénétration de 80/100 et 150/200 ainsi que leur équivalent de type intermédiaire, soit un MG 90 et MG 175. La structure de la chaussée est présentée au tableau 6.1.

Tableau 6.1 – Structure de la chaussée sur le site expérimental de l'autoroute 10.

Section	Matériau	Épaisseur
Enrobé de surface	MB-16	60 mm
Enrobé de base	MB-16*	60 mm
Fondation supérieure	20-0 mm	150 mm
Fondation inférieure	56-0 mm	225 mm
Sous-fondation	Sable	375 mm

*liant d'accrochage entre les couches d'enrobé

6.2 Suivi de performance

Ce site a été l'objet d'un suivi de l'évolution de la fissuration, de la qualité de roulement (IRI), de l'orniérage et de la capacité portante depuis 1992. Les données employées pour cette

analyse proviennent d'un rapport sur la construction du site [EBA 1994] ainsi que des relevés sur la dégradation du site effectués par le ministère des Transports du Québec [Loignon & Savard 1997]. Les relevés pertinents pour cette étude sont l'évolution de la fissuration de l'enrobé dans les traces de roues, fissuration associée à la dégradation par fatigue. Les relevés dans le temps sont présentés au tableau 6.2 en fonction du type de bitume employé pour la formulation de l'enrobé. La fissuration est apparue tôt dans la vie de la chaussée sous-dimensionnée, ce qui permet le classement des enrobés en terme de résistance à la fissuration par fatigue malgré le peu d'années écoulées depuis la construction. On constate que les enrobés formulés avec les bitumes 150/200 et MG 175 ont mieux résisté à la dégradation par fatigue que leurs homologues. Les bitumes sont décrits à la section suivante.

**Tableau 6.2 – Évolution de la fissuration en pistes de roue (mm/m²)
sur le site de l'autoroute 10.**

Temps	80/100	MG 90	150/200	MG 175
1 an	5,2	2,8	0,0	0,8
2 ans	11,4	4,4	0,5	1,1
2½ ans	35,4	18,0	3,5	7,7
4 ans	34,5*	53,0	4,6	9,9

*diminution apparente de la fissuration en piste de roue dû à son évolution sous forme de carrelage comptabilisé séparément (55,6 m²).

6.3 Description des enrobés

Le site présente quatre enrobés de type MB-16 composés de quatre bitumes différents. Ces enrobés ont été posés en deux couches d'une épaisseur de 60 mm collées avec un liant d'accrochage pour une épaisseur totale de 120 mm. Leur formulation a été effectuée selon la norme 4101 « Enrobés à chaud formulés selon le principe de la méthode Marshall ». Les essais prévus par la norme 4202 « Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des Chaussées » ont été effectués par la suite. Cette section présente la granulométrie unique pour la formulation des quatre enrobés ainsi que les quatre bitumes employés. On retrouve les caractéristiques détaillées de la formulation de ces enrobés en annexe V.

6.3.1 Granulométrie

La granulométrie MB-16 étudiée est de type semi-grenu avec un granulat de grosseur nominal maximal de 14 mm, tel que présenté par la courbe granulométrique de la figure 6.1. La granulométrie influence surtout la maniabilité et les caractéristiques volumétriques de l'enrobé, comme la teneur en bitume, le volume de bitume effectif (VBE), la densité maximale et la compacité. Le tableau 6.3 présente l'ensemble de ces valeurs qui ne sont pas influencées par le type de bitume employé.

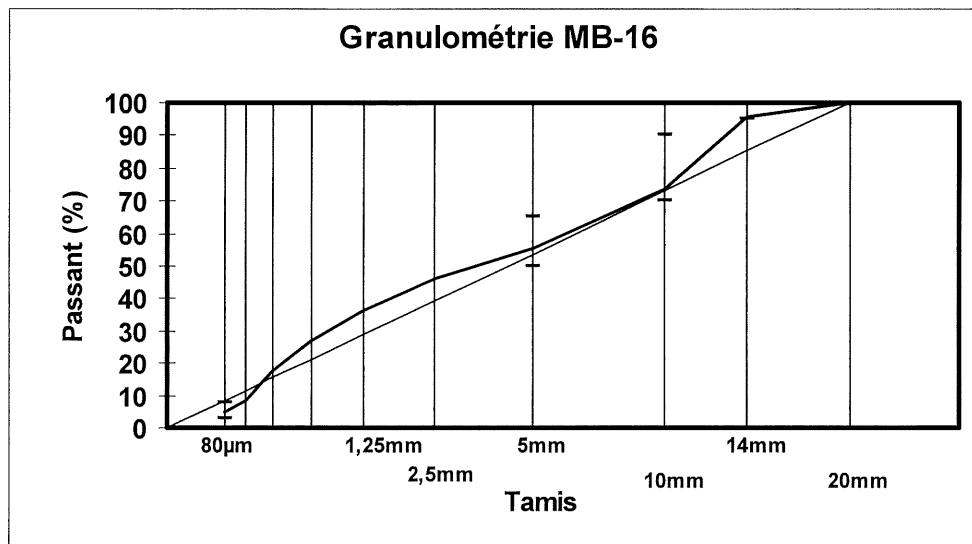


Figure 6.1 - Granulométrie des enrobés MB-16.

Tableau 6.3 – Description volumétrique des enrobés MB-16.

Enrobé	T. bitume	Vbe	D max	Compacité
MB-16	4,8 %	10,9 %	2,584	95,5 %

6.3.2 Bitume

Les bitumes employés dans le cadre de cette étude sont des bitumes de type conventionnel et intermédiaire. Les bitumes intermédiaires sont des bitumes conventionnels dont le processus de fabrication a été légèrement modifié mais qui ne contiennent aucun additif. Il est important de noter que ces bitumes étaient classés lors de la construction du site en 1992 selon leur indice de pénétration que l'on retrouve au tableau 6.4. Les bitumes employés sont de type

80/100, multigrade 90 (bitume 80/100 intermédiaire), 150/200 et multigrade 175 (bitume 150/200 intermédiaire). En 1994, donc suite à un entreposage de deux ans, ces bitumes ont été caractérisés à l'aide d'essais pour le classement des bitumes par classe de performance PG « Performance Grade ». Le tableau 6.4 présente les classes PG des différents bitumes ainsi les valeurs de PG réellement mesurées. Les écarts entre les valeurs de PG réellement mesurées Δ PG sont également indiqués pour les différents bitumes. En 1998, la caractérisation des bitumes a été effectuée à nouveau de manière à mesurer son évolution lors de l'entreposage. On retrouve également ces résultats au tableau 6.4.

Tableau 6.4 – Pénétration et classes PG des bitumes employés pour la formulation des enrobés MB-16.

Paramètres	Caractérisation 1992 – pénétration				Caractérisation 1998			
	Caractérisation 1994 – classe PG							
	80/100	MG 90	150/200	MG 175	80/100	MG 90	150/200	MG 175
Pénétration à 25°C	95	97	165	179	64	---	120	122
Classe PG	58-22	64-28	52-28	52-34	58-22	64-28	52-28	58-34
PG réel	62-27	65-30	56-32	55-37	63-26	68-29	57-31	59-34
Δ PG réel	89	95	88	92	89	97	88	93

Bien que le bitume ait été entreposé dans des récipients fermés hermétiquement, on constate une évolution de ces propriétés dans le temps. L'indice de pénétration a chuté entre le moment de l'échantillonnage et celui du début de l'étude. De même, la caractérisation des PG indique que de 1994 à 1998 le bitume s'est effectivement rigidifié puisque les valeurs de PG ont légèrement augmentées, principalement en ce qui concerne les bitumes intermédiaires. Par ailleurs, les écarts Δ PG sont pratiquement demeurés les mêmes.

6.4 Méthodologie

Les enrobés que l'on retrouve sur le site expérimental ont été reconstitués en laboratoire à partir de matériaux échantillonnés et entreposés lors de la construction. Les granulats ont été entreposés dans des sacs plastiques et les différents types de bitume dans des contenants métalliques fermés hermétiquement. Ainsi, la courbe granulométrique des enrobés a été

reconstituée à partir des 4 classes granulaires utilisées à l'époque. Le malaxage et le compactage des plaques ont été effectués en respectant la température de malaxage, qui correspond à la température où le bitume a une viscosité de 170 mm²/s, et la température de compactage, qui correspond à la température du bitume lorsque sa viscosité est de 280 mm²/s.

La rigidité et l'angle de phase de chaque enrobé ont été caractérisés par des essais de balayage de fréquence à des températures de 5 et 15°C et des fréquences de 1, 3, 10 et 30 Hz. Chaque caractérisation a été effectuée trois fois. Les relations de Whöler (fatigue) ont été caractérisées à déformation contrôlée pour des températures de 5 et 15°C et une fréquence de 10 Hz. La caractérisation s'est limitée à ces deux températures dû à la quantité limitée de matériel disponible, ce qui n'a pas permis une caractérisation plus importante. Les essais de fatigue sur un enrobé ont été effectués à deux niveaux de déformation de manière à décrire une droite. Pour chaque niveau de déformation, trois essais ont été effectués. Le nombre de cycles visé à haut niveau de déformation était de 35 000 cycles et à faible niveau de déformation de 350 000 cycles. Les températures employées dans le cadre de cette étude cherchent à représenter la température critique correspondant au dégel de la chaussée (5°C) et la température effective correspondant à la moyenne des dommages en fatigue subis par l'enrobé au cours d'une année (15°C).

6.5 Caractérisation de la rigidité

Tel que discuté lors de la caractérisation des enrobés ESG-14 et GB-20, la valeur de rigidité que l'on désire employer pour la conception des chaussées est le module dynamique E qui constitue la valeur maximale de la rigidité pour une température et fréquence donnée. Ainsi, dans le cadre de cette étude, uniquement les valeurs des essais de balayage de fréquence sont considérés pour l'analyse de la rigidité. Par ailleurs, l'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue est également étudiée afin de valider les observations effectuées sur les enrobés ESG-14 et GB-20 à ce sujet.

6.5.1 Résultats des essais de balayage de fréquence

Des essais de balayage de fréquence ont été effectués à 5 et 15°C sur les quatre enrobés du site de l'autoroute 10. Des valeurs de rigidité en fonction du temps et de la température ont été obtenues, ce qui permet de tracer les isothermes de ces enrobés à la figure 6.2. En ce qui concerne les isochrones, il n'est pas pertinent de les présenter puisque uniquement deux températures ont été caractérisées.

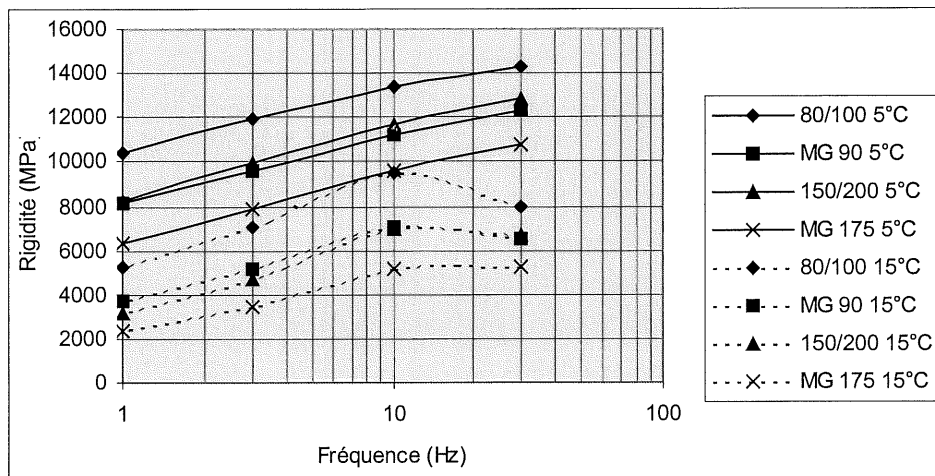


Figure 6.2 – Isothermes de E pour les enrobés MB-16.

La distribution des résultats semble conforme aux attentes et on observe principalement que la rigidité de l'enrobé est plus élevée à haute fréquence et à basse température. Par contre, il existe une exception pour les résultats obtenus à 15°C et 30 Hz où on observe une diminution de la rigidité comparativement aux résultats obtenus à 10 Hz pour la même température. Il est possible que dans ces conditions de chargement, les résultats obtenus soient discutables puisqu'à 30 Hz les vibrations sont importantes et qu'à 15°C une poutre d'enrobé présente une légère tendance au fluage. Par ailleurs, en dépit de ce comportement, on constate que l'enrobé formulé avec le bitume 80/100 présente la plus grande rigidité alors que l'enrobé formulé avec le bitume MG 175 présente la plus faible. Les enrobés formulés avec les bitumes MG 90 et 150/200 présentent des valeurs de rigidité similaires quelle que soit la fréquence ou la température étudiée. La rigidité de ces derniers est comparable à la rigidité de l'enrobé GB-20

formulé avec un bitume conventionnel. L'influence de la température sur la diminution de la rigidité est similaire à celle observée sur l'enrobé GB-20, quel que soit le type de bitume.

Basé sur les observations concernant l'enrobé GB-20, il est possible de développer des modèles de module dynamique E en fonction de la température et du logarithme de la fréquence bien qu'uniquement deux températures aient été caractérisées. Le tableau 6.5 présente ces modèles de type logarithmique linéaire qui sont valides pour une plage de fréquence de 1 à 30 Hz et une plage de température de 5 à 15°C. Les valeurs du coefficient de détermination R^2 , de l'écart type σ et du degré de liberté DL des modèles sont également fournies. Tel que constaté pour l'enrobé GB-20, les modèles développés en fonction du type de bitume sont très précis avec un R^2 supérieur à 90%, alors que le modèle général manque légèrement de précision pour être recommandé puisque son R^2 est inférieur à 80%. Il faudrait ajouter un paramètre au modèle général concernant le type de bitume employé pour augmenter sa précision, ce qui n'est pas l'objectif de cette étude.

Tableau 6.5 – Modèles de rigidité E (MPa) en fonction de la température T (°C) et de la fréquence fr (Hz) pour les enrobés MB-16.

Bitume	Modèle	R^2	σ	D.L.
80/100	$E = 10^{(4,12 - 0,023 T)} fr^{0,117}$	0,91	0,045	21
MG 90	$E = 10^{(4,04 - 0,027 T)} fr^{0,148}$	0,94	0,044	21
150/200	$E = 10^{(4,04 - 0,031 T)} fr^{0,179}$	0,93	0,054	21
MG 175	$E = 10^{(3,94 - 0,034 T)} fr^{0,201}$	0,94	0,056	21
Général	$E = 10^{(4,04 - 0,029 T)} fr^{0,162}$	0,76	0,097	93

Bien que la rigidité initiale de l'essai de fatigue ne soit pas considérée pour la conception, il est intéressant d'analyser l'écart entre S_{50} et E afin de confirmer les observations sur l'enrobé GB-20. On sait que S_{50} est plus faible que E dû à l'endommagement accumulé suite aux 50 premiers cycles de chargement. Les distributions de S_{50} et E en fonction de la température présentées à la figure 6.3 sont pratiquement parallèles tel qu'observé pour l'enrobé GB-20. L'écart moyen pour les quatre enrobés est de 1 045 MPa avec un coefficient de variation de 11%, ce qui indique que cet écart varie peu d'un enrobé et d'une température à l'autre. L'écart de rigidité entre S_{50} et E est similaire à celui observé pour l'enrobé GB-20 qui était de 1 220 MPa. Ainsi, on connaît maintenant l'ordre de grandeur de la perte de rigidité engendrée par les

50 premiers cycles de l'essai de fatigue, du moins en ce qui concerne les enrobés caractérisés dans le cadre de ce projet.

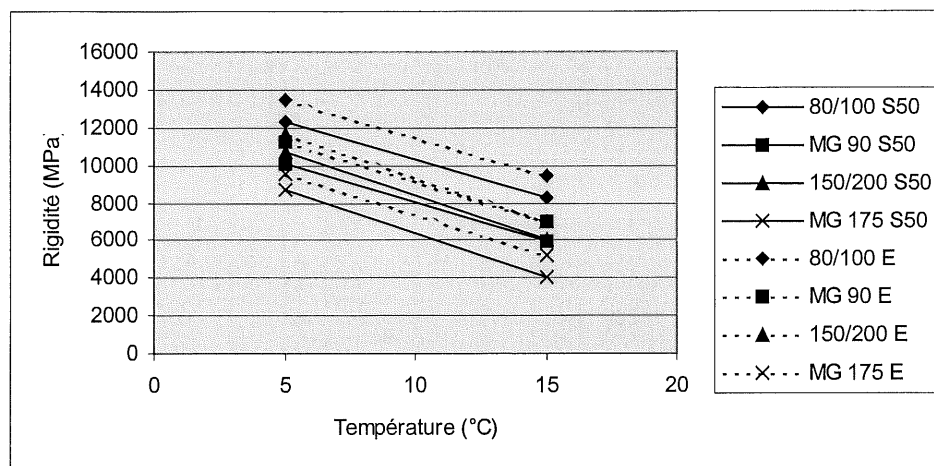


Figure 6.3 – Distribution de S_{50} et E en fonction de la température pour les enrobés MB-16.

6.5.2 Évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue

Il est également pertinent d'étudier l'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue afin de compléter l'analyse proposée pour les enrobés ESG-14 et GB-20. La distribution des différentes définitions de la rigidité, soit S_{50} , S_0 , $S_{1/2}$ et S_r , tel que définie à la figure 5.7, ne seront pas reproduites en fonction de la température puisque uniquement deux températures ont été caractérisées. D'ailleurs, la plupart des observations sur les enrobés ESG-14 et GB-20 sont basées sur les rapports entre les différentes valeurs de rigidité.

Généralement, la valeur de rigidité initiale S_{50} est plus grande que la valeur initiale de S_0 à laquelle on soustrait la période d'échauffement. À la figure 6.4, le rapport S_0/S_{50} pour l'enrobé MB-16 est en moyenne de 93% à 5°C et de 73% à 15°C avec un coefficient de variation inférieur à 10% (annexe VI). Le même rapport était de 92% à 5°C et de 71% à 15°C pour l'étude des enrobés ESG-14 et GB-20 avec un coefficient de variation également inférieur à 10% (annexe VI). Ainsi, on observe que l'écart entre ces deux valeurs augmente avec la température, quelque soit le type d'enrobé. De plus, on constate que le type de granulométrie

et de bitume influence peu l'écart relatif entre ces deux valeurs, ce qui semble indiquer que la température est le paramètre qui influence principalement l'ampleur de la période d'échauffement.

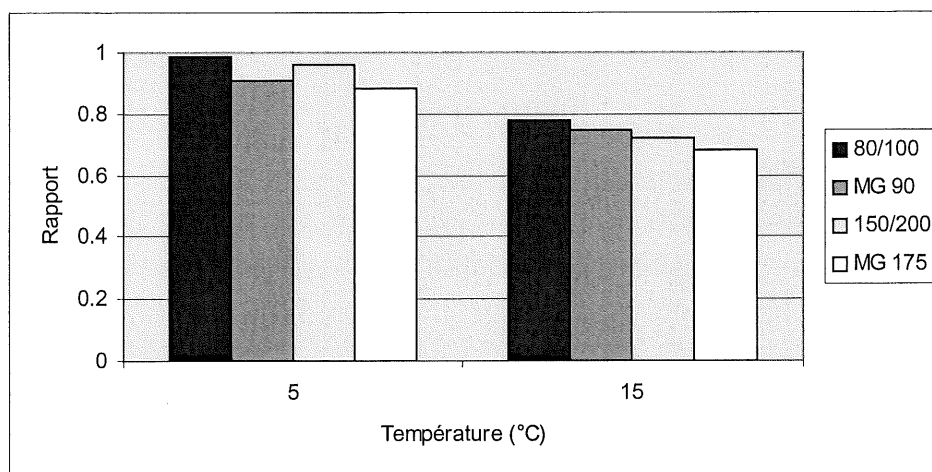


Figure 6.4 – Histogramme des rapports S_0/S_{50} en fonction de la température pour les enrobés MB-16.

La norme stipule que la rupture est atteinte lorsque la rigidité initiale S_{50} a diminué de moitié S_{25} . Une approche alternative pour éviter de fixer une rupture arbitraire $N_{1/2}$ consiste à caractériser un point de rupture N_r sur la courbe d'évolution de la rigidité lors de l'essai de fatigue. Le rapport S_r/S_{50} est généralement inférieur à 50%, tel que confirmé par la figure 6.5, ce qui indique que la rupture se produit probablement plus tard que l'indique la norme. Dans le cas de l'enrobé MB-16, le rapport varie de 41% à 5°C à 30% à 15°C sans qu'on observe de différence notable entre les types de bitume. Cette observation est conséquente avec la caractérisation des enrobés ESG-14 et GB-20 qui donne un rapport de 39% à 5°C et de 29% à 15°C qui n'est également pas influencé par la granulométrie et le type de bitume. Ainsi, il semble que la température soit le paramètre d'influence principal sur l'évolution de la dégradation par fatigue d'un enrobé, lorsque l'on tient compte de la période d'échauffement dans le processus de dégradation par fatigue de l'enrobé.

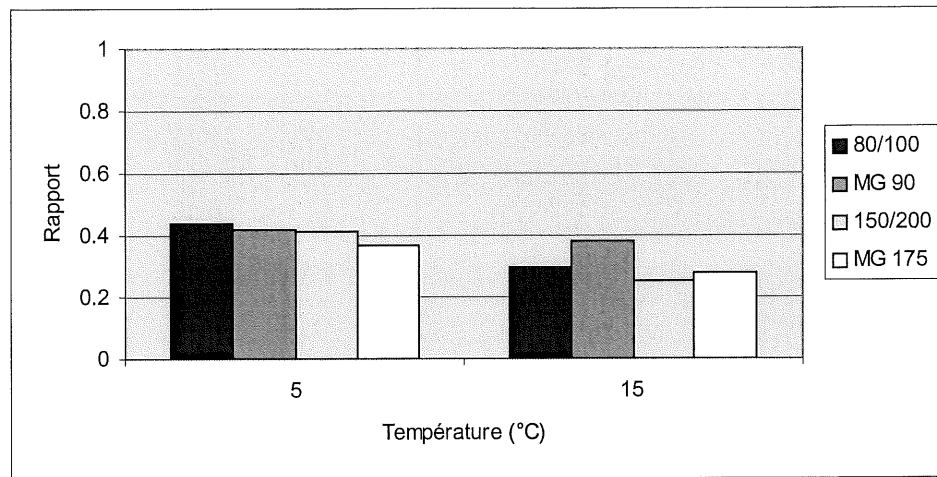


Figure 6.5 – Histogramme des rapports S_r/S_{50} en fonction de la température pour les enrobés MB-16.

Afin de soustraire l'effet de l'échauffement à l'analyse de la rupture par fatigue, on peut employer la valeur de la rigidité initiale S_0 extrapolée de la période où l'endommagement se fait principalement par fatigue. Le rapport $S_{1/2}/S_0$ est généralement supérieur à 50% puisque S_0 est généralement inférieur à S_{50} . À la figure 6.6, le rapport est de 55% à 5°C et 68% à 15°C avec un coefficient de variation inférieur à 10% (annexe VI). Le rapport obtenu pour la caractérisation des enrobés ESG-14 et GB-20 est de 55% à 5°C et 72% à 15°C. Ces rapports demeurent largement influencés par la température parce que la valeur de $S_{1/2}$ tient compte de la période d'échauffement dans sa définition. Une augmentation de la température diminue la perte de rigidité par fatigue enregistrée selon la norme $N_{1/2}$ au profit d'une perte de rigidité attribuable à l'échauffement, tel que mentionné au sujet des enrobés ESG-14 et GB-20.

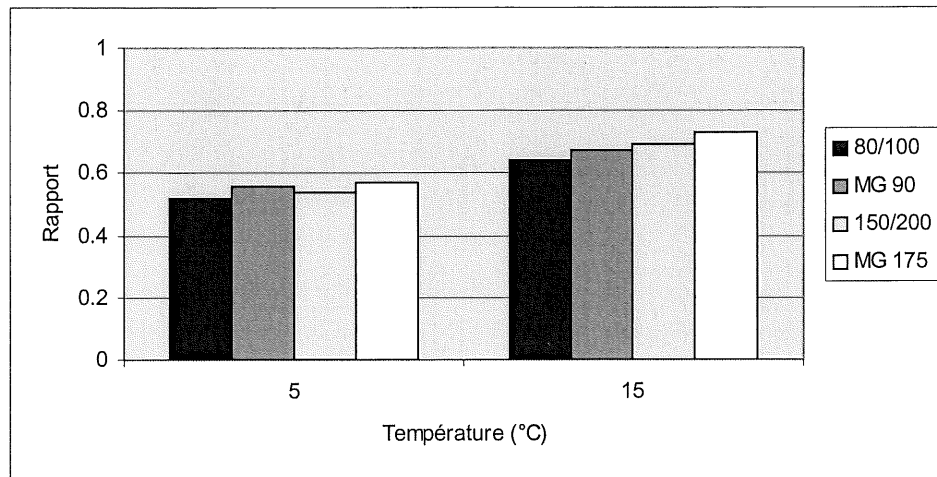


Figure 6.6 – Histogramme des rapports S_r/S_0 en fonction de la température pour les enrobés MB-16.

Pour connaître la véritable perte de rigidité engendrée par fatigue, on peut employer le rapport entre S_r et S_0 . À la figure 6.7, ce rapport est de 44% à 5°C et de 41% à 15°C, ce qui ne semble pas constituer une différence significative. La moyenne de l'ensemble des rapports est de 43% avec un coefficient de variation de 12 %, ce qui est comparable aux enrobés de base qui présentent un rapport moyen de 45% avec un coefficient de variation de 15 %. Bien qu'on observe une légère variation entre les rapports, on estime qu'ils ne sont pas influencés par la température ou le type d'enrobé caractérisé. En fait, il pourrait s'agir d'un rapport fixe, une approche intéressante pour le développement d'une définition fondamentale de la résistance à la fatigue en laboratoire.

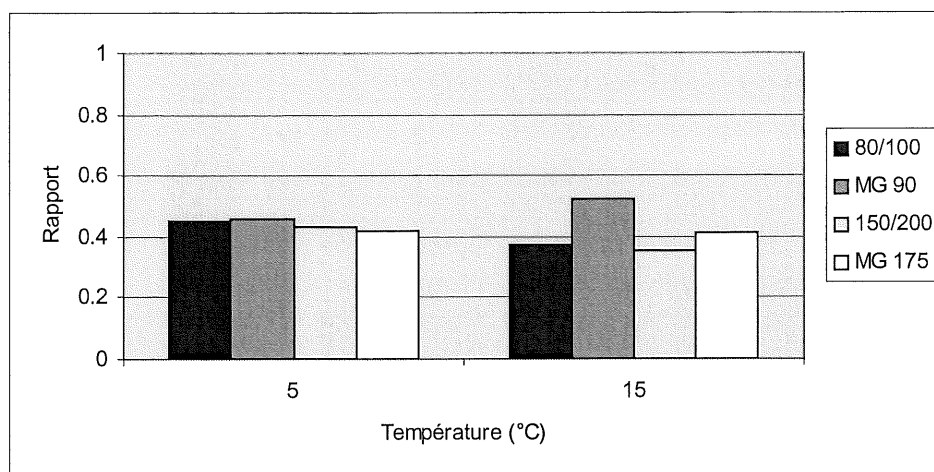


Figure 6.7 – Histogramme des rapports S_r/S_0 en fonction de la température pour les enrobés MB-16.

6.6 Caractérisation de l'angle de phase

L'angle de phase a également été caractérisé lors des essais de balayage de fréquence, ce qui permet de définir le module complexe des quatre types d'enrobé MB-16 étudiés. Les résultats des essais de balayage de fréquence sont également disponibles pour le développement des modèles. D'autre part, l'angle de phase mesuré lors des essais de fatigue permet de décrire l'évolution de l'endommagement lors de cet essai.

6.6.1 Résultats des essais de balayage de fréquence

Les essais de balayage de fréquence permettent de tracer les isothermes des valeurs d'angle de phase dynamique φ en fonction de la fréquence, comme le montre la figure 6.8. Par ailleurs, aucun isochrone n'est présenté puisqu'il n'y a pas eu de balayage de température.

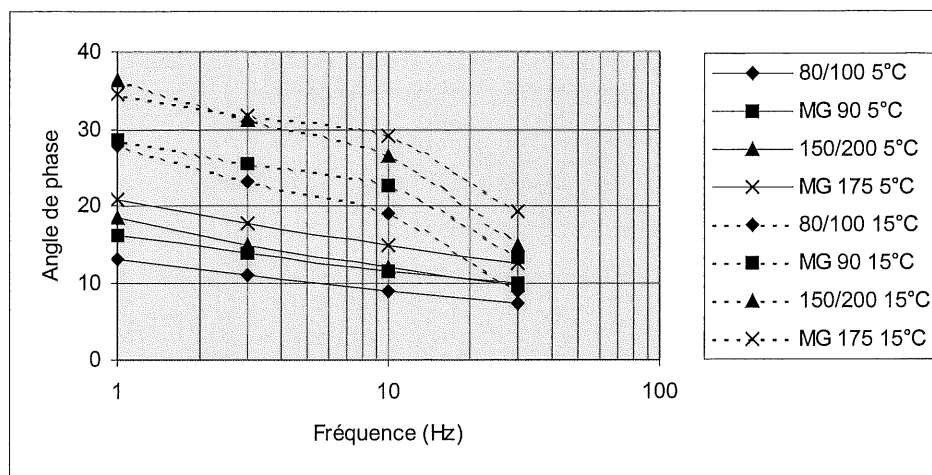


Figure 6.8 – Isothermes de ϕ pour les enrobés MB-16.

Bien entendu, on observe que ϕ est plus faible à haute fréquence et à basse température. Les valeurs semblent se distribuer uniformément en fonction de la fréquence à 5°C, ce qui n'est pas le cas pour les résultats à 15°C, principalement en ce qui concerne les valeurs mesurées à 30 Hz. Ce constat concorde avec les observations effectuées sur la rigidité, ce qui semble confirmer qu'il y a effectivement un problème pour ces conditions de chargement, soit associé aux limites physique de l'enrobé ou de l'appareillage. Malgré ce problème, il semble clair que l'enrobé formulé avec un bitume MG 175 présente l'angle le plus élevé quel que soit la fréquence ou la température, alors que l'enrobé formulé avec un bitume 80/100 présente l'angle le plus faible. En ce qui concerne les deux autres enrobés leur comportement semble plus variable. L'enrobé formulé avec un bitume 150/200 présente un angle à peine plus élevé que l'enrobé formulé avec un bitume MG 90 pour une température de 5°C alors que l'écart devient très important entre les deux à 15°C.

Bien qu'uniquement deux températures soit étudiées, il est possible de développer des modèles en fonction de la température et du logarithme de la fréquence au tableau 6.6. Tel que constaté pour l'enrobé GB-20, les modèles développés en fonction du type de bitume sont plus précis, avec un R^2 généralement supérieur à 90%. Le modèle général présente un R^2 inférieur à 80%, ce qui semble indiquer que le modèle général devrait comporter un paramètre pour décrire l'influence du bitume afin d'augmenter sa précision.

Tableau 6.6 – Modèles d'angle de phase ϕ (°) en fonction de la température T (°C) et de la fréquence fr (Hz) pour les enrobés MB-16.

Type	Modèle	R ²	σ	D.L.
80/100	$\phi = 10^{(1,03 + 0,027 T)} fr^{-0,248}$	0,87	0,078	21
MG 90	$\phi = 10^{(1,11 + 0,024 T)} fr^{-0,179}$	0,93	0,046	21
150/200	$\phi = 10^{(1,14 + 0,029 T)} fr^{-0,220}$	0,95	0,047	21
MG 175	$\phi = 10^{(1,20 + 0,024 T)} fr^{-0,155}$	0,95	0,035	45
Général	$\phi = 10^{(1,12 + 0,026 T)} fr^{-0,201}$	0,77	0,095	93

En dernier lieu, il est pertinent de comparer les valeurs de ϕ_{50} obtenues des essais de fatigue et ϕ obtenues des essais de balayage de fréquence de manière à confirmer les observations sur l'enrobé GB-20. Les valeurs de ϕ_{50} sont plus élevées que les valeurs de ϕ principalement dû à l'endommagement par échauffement accumulé suite aux 50 premiers cycles de chargement de l'essai de fatigue. Selon la représentation de la figure 6.9, l'écart entre les angles semble plus important à 15°C. Par ailleurs, le rapport entre ϕ_{50} et ϕ est relativement constant à environ 1,22 avec un coefficient de variation de 5% (annexe VI). Ce rapport est similaire à celui obtenu pour l'enrobé GB-20 qui est de 1,33 avec un coefficient de variation de 6 %, ce qui donne une moyenne d'environ 1,3 pour l'ensemble des enrobés. Ainsi, on constate qu'il y a effectivement de l'endommagement qui s'accumule dès les 50 premiers cycles de chargement de l'essai de fatigue.

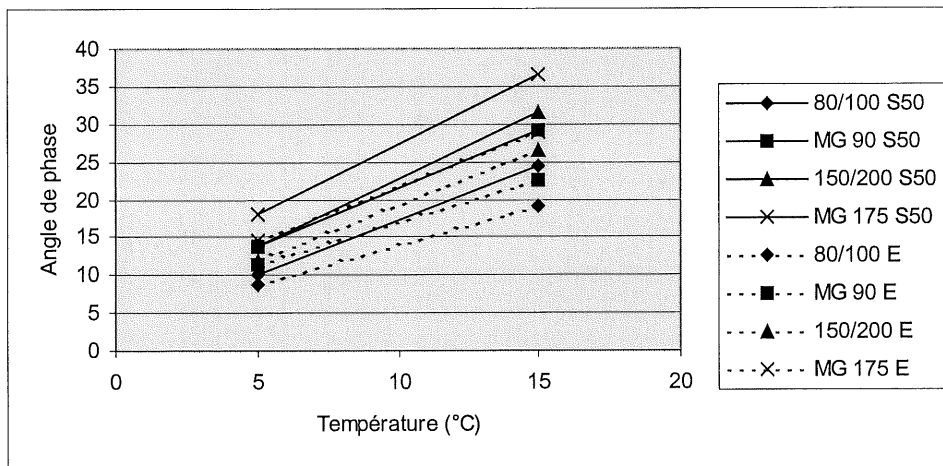


Figure 6.9 – Distribution de ϕ_{50} et ϕ en fonction de la température pour les enrobés MB-16.

6.6.2 Analyse du module complexe

Le véritable module d'un matériau viscoélastique est son module complexe. Bien qu'il ne soit pas pratique à employer, il est intéressant de le caractériser par un diagramme de Black. La figure 6.10 présente le diagramme de Black pour les valeurs moyennes en fonction des températures et des fréquences caractérisées par les essais de balayage de fréquence.

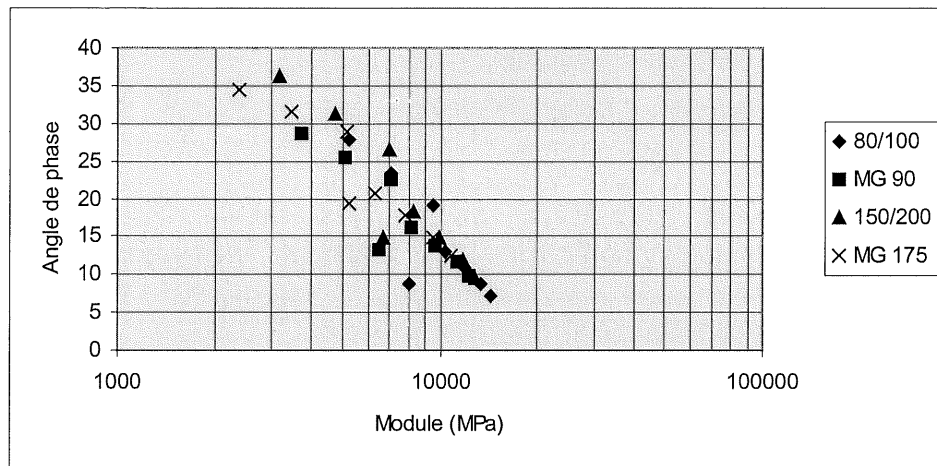


Figure 6.10 – Représentation de Black en fonction de E et ϕ pour les enrobés MB-16.

Bien que les résultats soient relativement dispersés à la figure 6.10, on observe tout de même que la distribution des résultats semble peu influencée par le type de bitume employé. Ainsi, il semble possible de représenter le diagramme de Black à la figure 6.11 avec l'ensemble des valeurs caractérisées sur l'enrobé MB-16, sans faire de distinction entre les types de bitumes employés. On constate que la courbe de Black prend la forme d'une droite mal définie avec un R^2 de 0,82, ce qui est attribuable à la grande dispersion des points. La valeur du module élastique est de 21 540 MPa, ce qui diffère largement de la valeur de 15 800 MPa pour l'enrobé GB-20, donc qui semble élevée et peu fiable comme valeur.

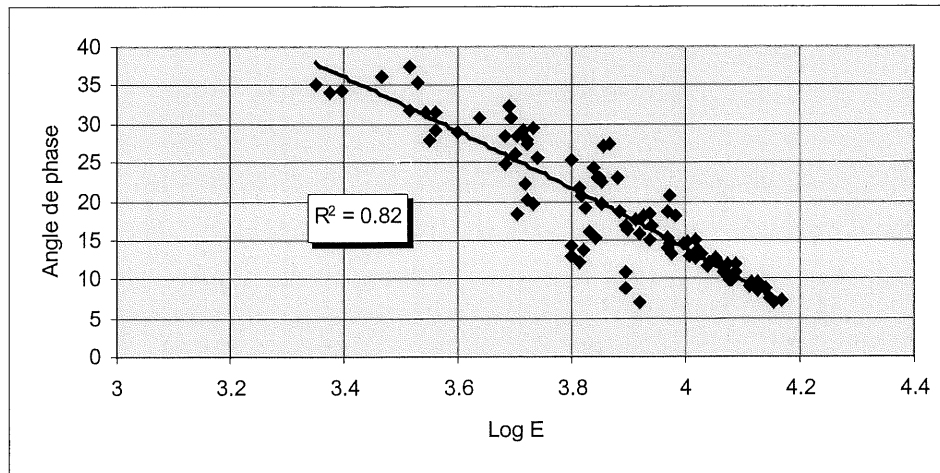


Figure 6.11 – Représentation de Black avec E et φ ainsi que S_{50} et ϕ_{50} pour les enrobés MB-16.

Pour compléter l'analyse de la courbe de Black de l'enrobé MB-16, on présente conjointement cette courbe avec la courbe de l'enrobé GB-20 à la figure 6.12. On constate que ces courbes se superposent, ce qui laisse supposer que la courbe de l'enrobé MB-16 convergerait également vers une valeur de module élastique similaire à l'enrobé GB-20, si elle était caractérisée sur une plus grande plage de température. Ainsi, il semble qu'une caractérisation additionnelle à une température plus élevée que 15°C soit nécessaire pour décrire convenablement la courbe de Black d'un enrobé.

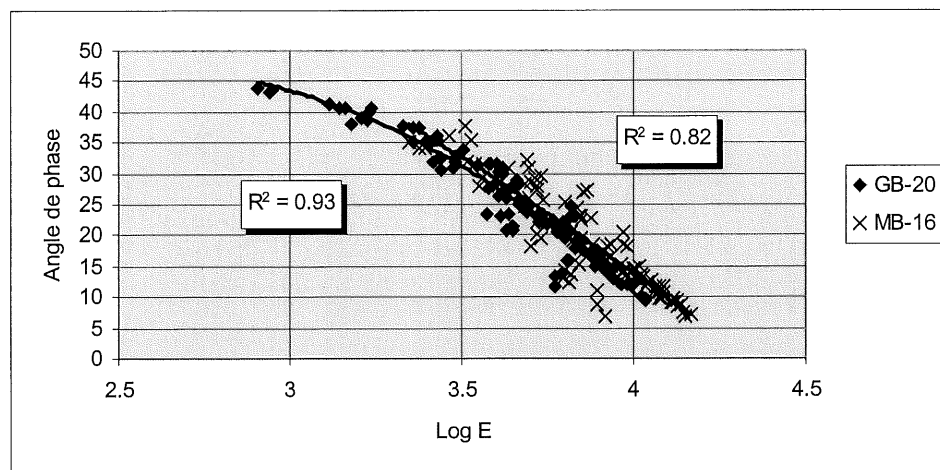


Figure 6.12 – Représentation de Black en fonction de E et φ pour les enrobés GB-20 et MB-16.

6.6.3 Évolution de l'angle de phase lors de l'essai de fatigue

On reconnaît trois valeurs d'angle de phase caractéristiques lors de son évolution au cours de l'essai de fatigue. On distingue les deux définitions de l'angle à la rupture $\phi_{1/2}$ et ϕ_r ainsi que la valeur de l'angle de phase initial ϕ_{50} . Par ailleurs, on sait que les valeurs de $\phi_{1/2}$ et ϕ_r sont pratiquement égales. Ainsi, pour des raisons strictement pratiques, uniquement la valeur de $\phi_{1/2}$ est employée pour l'analyse proposée.

Si l'on considère la distribution de $\phi_{1/2}$ et ϕ_{50} à la figure 6.13, on constate que leur écart est plus important à 15°C. Par ailleurs, leur rapport est relativement constant avec une valeur de 1,36 et un coefficient de variation de 10 % (annexe VI). Le rapport pour les enrobés ESG-14 et GB-20 est de 1,23, ce qui donne un rapport moyen d'environ 1,3 pour l'ensemble des enrobés. Ce rapport est égal au gain d'angle de phase entre ϕ et ϕ_{50} , ce qui confirme que l'endommagement suite au 50 premiers cycles n'est pas négligeable dans l'analyse des données puisqu'il semble similaire à l'endommagement que l'enrobé subit par la suite. Ce constat appuie la décision d'employer l'essai de balayage de fréquence pour mesurer les paramètres de l'enrobé non-endommagé.

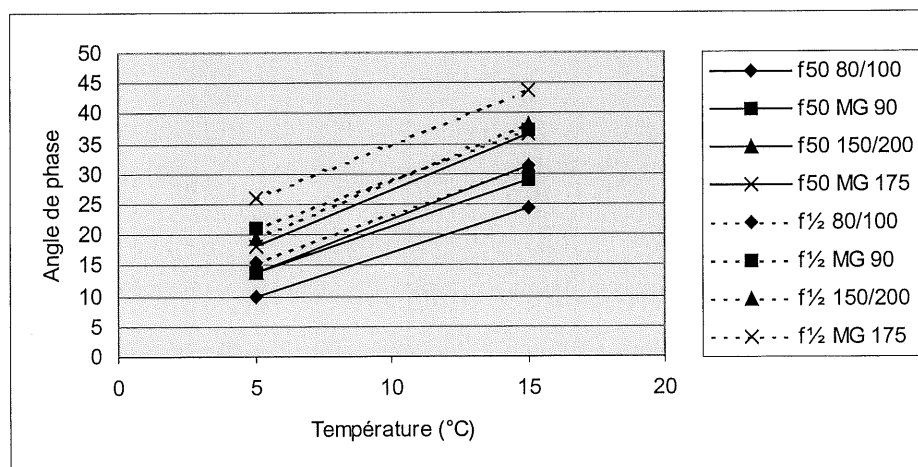


Figure 6.13 – Distribution de $\phi_{1/2}$ et ϕ_{50} en fonction de la température pour les enrobés MB-16.

6.7 Caractérisation de la résistance à la fatigue

Des relations de Whöler ont été caractérisées pour les quatre types d'enrobés MB-16 à 2 températures, soit 5 et 15°C. Basé sur le suivi de la dégradation du site, l'objectif de cette caractérisation est de développer une méthode de classement en laboratoire qui permette de déterminer le meilleur enrobé à employer sur la route. Il est également question du développement de modèles généraux pour prédire la durée de vie des enrobés en ce qui concerne la fissuration par fatigue.

6.7.1 Équations de fatigue

Une relation de Whöler a été développée pour chaque type d'enrobé et chaque température, ce qui donne 8 modèles au total. Chacun de ces modèles a été caractérisé selon les deux définitions de la rupture pour une température de 5°C au tableau 6.7 et une température de 15°C au tableau 6.8. Leur coefficient de détermination R^2 , leur écart-type σ ainsi que leur degré de liberté DL sont également indiqués. Bien que la précision des modèles semble généralement acceptable, leur faible degré de liberté, limite la confiance qu'on peut leur porter. Certains modèles présentent une pente qui semble éloignée de la valeur de pente moyenne de $-4,5$ déterminée par l'étude sur les enrobés ESG-14 et GB-20, ce qui risque de rendre l'analyse difficile. De plus, certains modèles présentent une variance élevée mais une pente près de $-4,5$, ce qui est un peu embarrassant.

Tableau 6.7 – Relations de Whöler à 5°C en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$) pour les enrobés MB-16.

Bitume	Modèle	R^2	σ	DL	Modèle	R^2	σ	DL
80/100	$N_{1/2} = 2,1 \cdot 10^{18} \varepsilon^{-5,0}$	0,79	0,252	3	$N_r = 6,9 \cdot 10^{17} \varepsilon^{-4,8}$	0,71	0,300	3
MG 90	$N_{1/2} = 8,1 \cdot 10^{21} \varepsilon^{-6,3}$	0,97	0,083	4	$N_r = 2,5 \cdot 10^{19} \varepsilon^{-5,3}$	0,90	0,150	4
150/200	$N_{1/2} = 7,2 \cdot 10^{16} \varepsilon^{-4,6}$	1,00	0,040	3	$N_r = 5,1 \cdot 10^{16} \varepsilon^{-4,5}$	1,00	0,042	3
MG 175	$N_{1/2} = 4,1 \cdot 10^{20} \varepsilon^{-5,8}$	0,94	0,216	3	$N_r = 3,9 \cdot 10^{19} \varepsilon^{-5,4}$	0,90	0,272	3

Tableau 6.8 – Relations de Whöler à 15°C en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$) pour les enrobés MB-16.

Bitume	Modèle	R ²	σ	DL	Modèle	R ²	σ	DL
80/100	$N_{1/2} = 1,0 \cdot 10^{13} \varepsilon^{-3,2}$	0,99	0,052	2	$N_r = 1,2 \cdot 10^9 \varepsilon^{-1,6}$	0,85	0,095	2
MG 90	$N_{1/2} = 1,0 \cdot 10^{17} \varepsilon^{-4,4}$	0,88	0,224	3	$N_r = 1,5 \cdot 10^{17} \varepsilon^{-4,4}$	0,95	0,140	3
150/200	$N_{1/2} = 1,1 \cdot 10^{16} \varepsilon^{-4,2}$	0,96	0,110	4	$N_r = 2,2 \cdot 10^{15} \varepsilon^{-3,9}$	0,89	0,182	4
MG 175	$N_{1/2} = 9,3 \cdot 10^{16} \varepsilon^{-4,4}$	0,97	0,089	4	$N_r = 6,0 \cdot 10^{15} \varepsilon^{-3,9}$	0,92	0,121	4

Les relations de Whöler sont représentées aux figures 6.14 et 6.15 pour les deux définitions de la rupture. Il est important de noter que les points indiqués sur les graphiques servent uniquement à identifier les droites et que les points mesurés se situent entre ces extrémités, soit à environ 35 000 et 350 000 cycles. La représentation des véritables relations de Whöler se retrouve en annexe VI. On constate que la température semble peu influencer la résistance à la fatigue des enrobés mis à part l'enrobé formulé avec le bitume 80/100 à faible déformation et les enrobés formulés avec les bitumes MG90 et MG 175 à grande déformation. Ces écarts sont principalement attribuables à la différence entre les pentes des relations caractérisées à 5°C et à 15°C. On constate également que les enrobés formulés avec les bitumes intermédiaires MG 90 et MG 175 présentent une résistance à la fatigue similaire qui est plus élevée que celle mesurée pour les enrobés formulés avec les bitumes conventionnels 80/100 et 150/200.

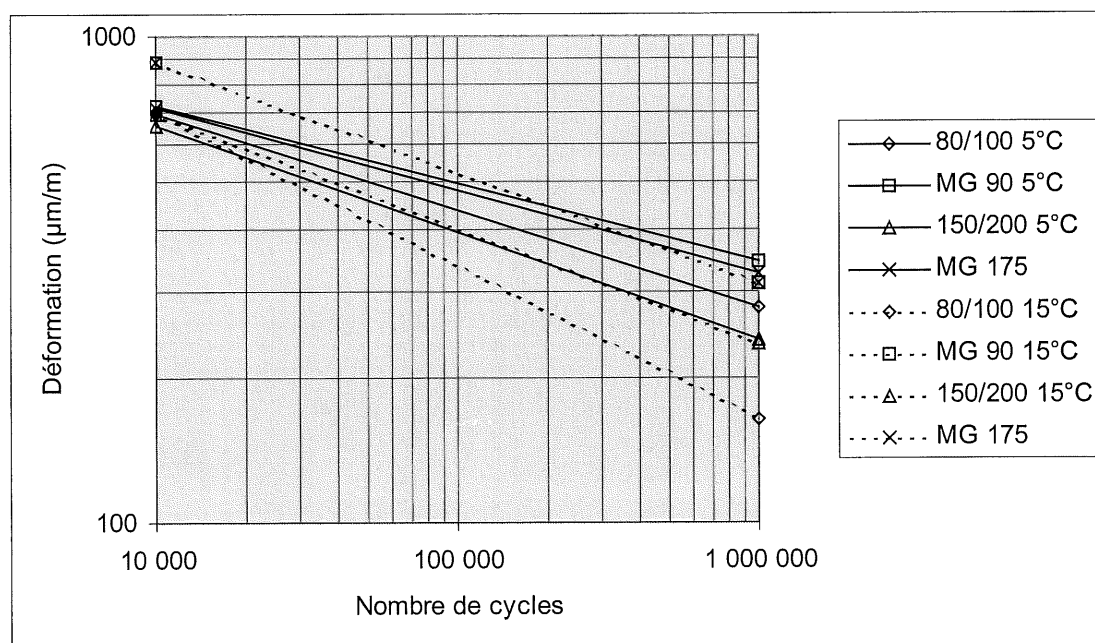


Figure 6.14 – Représentation des relations de Whöler $N_{1/2}$ pour les enrobés MB-16.

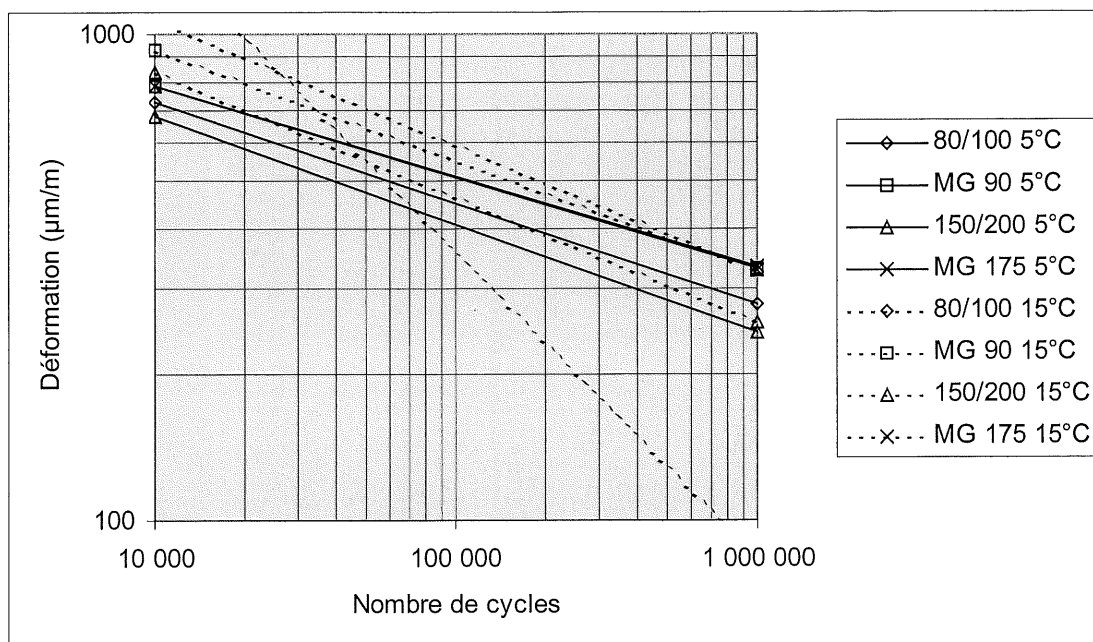


Figure 6.15 – Représentation des relations de Whöler N_r pour les enrobés MB-16.

Les observations sur l'enrobé MB-16 semblent indiquer une certaine influence de la température sur la pente des modèles tel que le montre l'histogramme de la figure 6.16. En effet, la pente moyenne passe de $-5,2$ à 5°C à $-4,2$ à 15°C sans tenir compte de la pente de l'enrobé formulé avec le bitume 80/100 à 15°C . En effet, en ce qui concerne l'enrobé formulé avec le bitume 80/100, la pente de la droite est beaucoup plus faible à 15°C ($-1,6$) ce qui rappelle le comportement identifié à 30°C pour l'enrobé GB-20. Cette observation pourrait indiquer que la résistance à la fatigue commence à diminuer à 15°C dans le cas de l'enrobé formulé avec un bitume 80/100. Il n'est pas possible de valider cette hypothèse puisque l'on dispose d'informations uniquement sur deux températures. La pente moyenne globale est de $-4,8$ avec un coefficient de variation de 14% , ce qui est similaire à la pente et au coefficient de variation de l'étude sur les enrobés ESG-14 et GB-20. Ainsi, l'approche par une pente moyenne sera également employée pour le développement de modèles généraux pour l'enrobé MB-16.

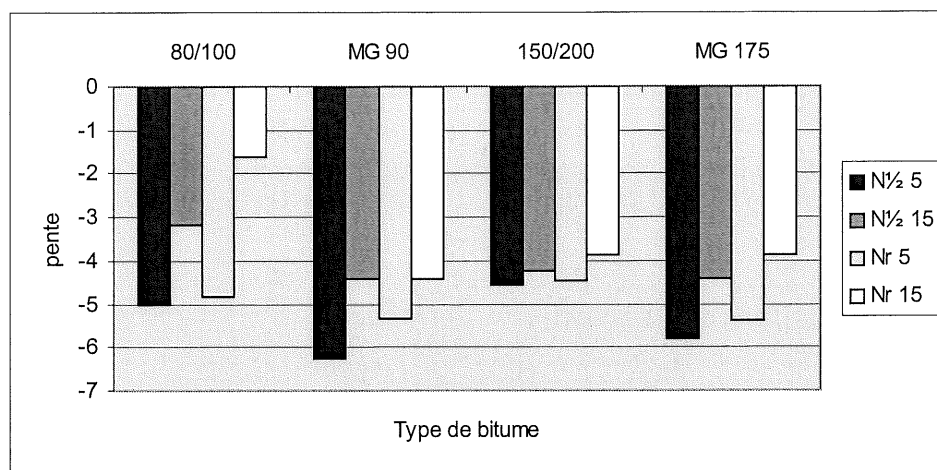


Figure 6.16 – Histogramme des pentes en fonction du type de bitume pour les enrobés MB-16.

En ce qui concerne l'ordonnée à l'origine, bien que largement influencée par la pente du modèle, sa distribution semble également sensible à la température selon l'histogramme de la figure 6.17. Avec l'augmentation de la température, la valeur de l'ordonnée à l'origine diminue, ce qui signifie que la résistance à la fatigue diminue contrairement aux observations usuelles. Il est probable que ce constat s'explique par un gain de résistance à la fatigue à basse température, tel qu'identifié pour les enrobés ESG-14 et GB-20 formulés avec un bitume conventionnel. Bien entendu, il ne s'agit que d'une hypothèse qu'il est impossible de confirmer puisque l'on dispose d'informations uniquement sur deux températures.

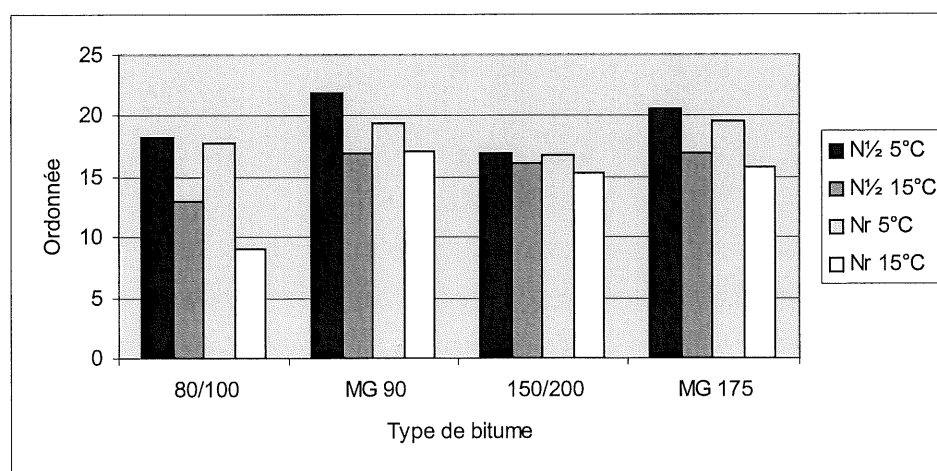


Figure 6.17 – Histogramme des ordonnées en fonction du type de bitume pour les enrobés MB-16.

Finalement, il est également possible d'analyser la distribution de ε_6 en fonction de la température de manière à confirmer les observations concernant l'ordonnée à l'origine. Les tableaux 6.9 et 6.10 présentent les valeurs ε_6 pour $N_{1/2}$ et N_r ainsi que l'écart-type σ associé à leur estimation. La précision des valeurs présentées semble acceptable puisque l'écart type est généralement inférieur à 0,3. Par ailleurs, il faut noter que les valeurs d'écart-type sont déterminées à partir de valeur logarithmique et risque tout de même de se traduire par des écarts importants lorsque l'on travaille avec les valeurs arithmétiques (non-logarithmique).

**Tableau 6.9 – Valeurs de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$)
estimées à partir des relations de Whöler $N_{1/2}$ des enrobés MB-16.**

Type d'enrobé	5°C		15°C	
	ε_6	σ	ε_6	σ
80/100	279	0,386	164	0,132
MG 90	344	0,120	312	0,296
150/200	236	0,058	232	0,158
MG 175	325	0,269	309	0,132

**Tableau 6.10 – Valeurs de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$)
estimées à partir des relations de Whöler N_r des enrobés MB-16.**

Type d'enrobé	5°C		15°C	
	ε_6	σ	ε_6	σ
80/100	281	0,464	84	0,369
MG 90	330	0,226	328	0,182
150/200	243	0,060	258	0,246
MG 175	332	0,339	325	0,175

L'histogramme de la figure 6.18 présente la distribution de ε_6 en fonction du type d'enrobé et de la température. Dans le cadre de cette étude, le type de bitume employé semble le paramètre le plus influent alors que la température semble peu influencer ε_6 , à l'exception de l'enrobé formulé avec le bitume 80/100 où ε_6 est plus grand à 5°C. Bien que ces observations concernant l'influence de la température semblent contraires au comportement généralement admis, elles sont considérées normales puisqu'un comportement similaire a été identifié lors de la caractérisation des enrobés ESG-14 et GB-20. Les enrobés formulés avec les bitumes intermédiaires MG 90 et MG 175 présentent un ε_6 supérieur aux enrobés formulés avec les

bitumes conventionnels 80/100 et 150/200. Ce constat indique que ces enrobés résistent mieux à la dégradation par fatigue en laboratoire tel que constaté au niveau des relations de Whöler. Ainsi, le paramètre ε_6 semble bien réussir à classer les relations de Whöler par un point unique.

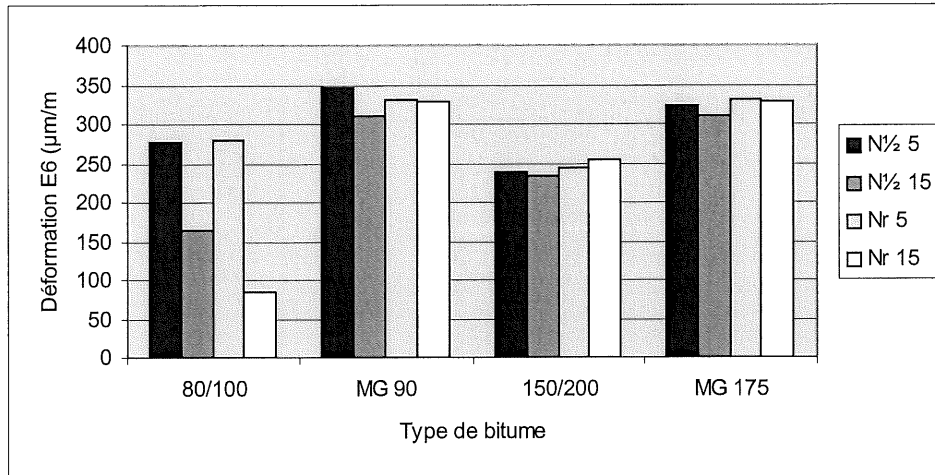


Figure 6.18 – Histogramme des ε_6 en fonction du type de bitume pour les enrobés MB-16.

6.7.2 Classement des enrobés

L'un des buts de cette étude est de développer une méthode de classement en laboratoire qui permette de déterminer quel enrobé sera le plus résistant à la fatigue sur la route. Les relevés de dégradation sur le site de l'autoroute 10 indiquent que les enrobés formulés avec les bitumes 150/200 et MG 175 ont mieux résisté à la fatigue que leurs homologues, tel que présenté au tableau 6.2. Ce constat ne semble correspondre qu'en partie au classement obtenu en laboratoire à partir de ε_6 à la figure 6.18 qui montre que les enrobés formulés avec les bitumes intermédiaires MG 90 et MG 175 résistent mieux à la sollicitation par fatigue en laboratoire. Ainsi, il semble que les essais de flexion aux tiers points n'ont pas permis de reproduire la performance des enrobés, tel qu'observé sur la route.

Dans le cadre de ce projet, la fondation de la chaussée et l'épaisseur des enrobées sont supposés identiques d'une section à l'autre, ce qui permet d'analyser simplement le comportement des enrobés en les comparants entre eux. Les valeurs de rigidité et d'angle de

phase de chacun des enrobés permettent d'évaluer la réaction de l'enrobé lors du passage d'un véhicule, ce qui complète l'information fournie par ε_6 sur la résistance à la fatigue de l'enrobé. On retrouve l'ensemble de ces données au tableau 6.11.

Tableau 6.11 – Valeurs de rigidité E (MPa), d'angle de phase ϕ (°) et de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$) mesurées à 5 et 15°C et 10 Hz pour les enrobés MB-16.

Bitume	5°C			15°C		
	E	ϕ	ε_6	E	ϕ	ε_6
80/100	13 422	8,8	278	9 447	19,1	164
MG 90	11 240	11,5	345	7 026	22,5	311
150/200	11 699	11,9	238	6 959	26,6	233
MG 175	9 580	14,7	324	5 146	29,0	311

Tel que discuté précédemment, l'enrobé 80/100 est le plus rigide et l'enrobé MG 175 est le moins rigide alors que les enrobés MG 90 et 150/200 présentent des rigidités similaires et intermédiaires. Ce constat signifie que lors du passage d'un véhicule, l'enrobé 80/100 présentera une déformation en tension plus faible que l'enrobé MG 175 et que les enrobés MG 90 et 150/200 présenteront des déformations similaires et intermédiaires. Puisque la déformation ε_6 est plus grande pour les enrobés MG 90 et MG 175, il semble que l'enrobé MG 90 devrait offrir une résistance à la fatigue supérieure à l'enrobé 150/200 qui présente environ la même rigidité. De même, la déformation ε_6 des enrobés MG 90 et MG 175 est similaire, ce qui indique que la résistance à la fatigue de l'enrobé MG 90 est supérieure à celle de l'enrobé MG 175 puisque sa rigidité est plus grande. Par contre, l'étude de la fissuration sur le site indique que ce sont les enrobés 150/200 et MG 175 qui ont le mieux résistés à la fatigue, ce qui semble contredire les résultats de la caractérisation en laboratoire. Ainsi, il semble qu'une analyse basée sur la rigidité et ε_6 ne soit pas suffisante pour classer les enrobés.

Dans le cadre de ce projet, il a été question de l'angle de phase de l'enrobé comme un paramètre complémentaire à la rigidité pour définir le module complexe de l'enrobé. Cet aspect n'est pas pris en compte dans l'analyse précédente. Il semble pertinent d'inclure l'angle de phase dans ce type d'analyse puisqu'il définit la rhéologie de l'enrobé, au même titre que la rigidité. Par contre, il est difficile d'inclure l'angle de phase dans une approche de conception

mécanistique basée sur les lois de l'élasticité. Une approche de cette problématique consiste à développer le module complexe en ses deux composantes, soit $|E^*| \cos \phi$ qui représente la composante élastique et $|E^*| \sin \phi$ qui représente la composante visqueuse. Le tableau 6.12 présente ces valeurs qui ne semblent toutefois pas aider le classement des enrobés en fonction de leur résistance à la fatigue.

Tableau 6.12 – Valeurs de $E \cos \phi$ (MPa) et $E \sin \phi$ (MPa) mesurées à 5 et 15°C et 10 Hz pour les enrobés MB-16.

Bitume	5°C		15°C	
	$E \cos \phi$	$E \sin \phi$	$E \cos \phi$	$E \sin \phi$
80/100	13 624	2 053	8 927	3 091
MG 90	11 014	2 241	6 491	2 689
150/200	11 448	2 412	6 222	3 116
MG 175	9 266	2 431	4 501	2 495

Le paramètre qui semble le plus clairement indiquer quel enrobé résiste le mieux à la fatigue est l'indice de pénétration du bitume. En effet, les enrobés formulés avec des bitumes présentant un indice de pénétration de 150/200 ont mieux résisté que leurs homologues avec un indice plus faible, donc plus dur. Cette observation laisse présager que l'aspect de dureté du bitume a un rôle important à jouer sur la capacité de l'enrobé à accumuler de la sollicitation par fatigue. De même, on observe que l'angle de phase est plus élevé pour ces bitumes, ce qui pourrait devenir éventuellement un paramètre de conception. Dans le cadre de cette étude, un angle de phase plus grand que 25° à 15°C et 10 Hz semble indiquer une meilleure résistance à la fatigue. De plus, il semble qu'une valeur de rigidité inférieure à 7000 MPa à 15°C et 10 Hz indique également une résistance à la fatigue accrue.

L'influence du bitume sur la résistance à la fatigue de l'enrobé peut également s'analyser par la caractérisation des PG des bitumes. Au tableau 6.4, on observe que ce sont les PG les plus faibles qui résistent le mieux à la fissuration par fatigue, ce qui correspond aux bitumes les plus mous. Ainsi, basé sur le suivi de la fissuration sur le site expérimental, il semble qu'il soit préférable que la valeur du PG réel à haute température soit inférieure à 60 et que la valeur du PG réel à basse température soit inférieure à -30 pour que l'enrobé résiste bien à la fatigue.

L'écart accru entre les deux valeurs de PG résultant d'une modification du bitume autre que par un additif, ne semble pas améliorer la performance de l'enrobé.

6.7.3 Modèles de fatigue généraux pour la température critique et effective

L'élaboration de modèles généraux en fonction de la température semble difficile basée uniquement sur la caractérisation de deux températures. Puisque la forme du lien qui unie les résultats entre 5 et 15°C est inconnu, il semble que les deux températures doivent être considérées séparément dans un premier temps. Ainsi, les modèles de cette section sont développés individuellement pour chaque température, ce qui donne deux modèles, soit un pour faire la conception selon une température critique de 5°C et un pour faire la conception selon une température effective de 15°C, tel que définie à la section 2.4.2. Par ailleurs, on peut tenter de développer des modèles généraux pour l'ensemble des enrobés MB-16 étudiées en incluant des paramètres pour considérer l'influence des différents bitume, ce qui répond à un besoin identifié lors de la caractérisation des enrobés ESG-14 et GB-20. Les tableaux 6.13 et 6.14 montrent des modèles développés selon la forme classique et en fonction de la rigidité E pour les deux définitions de la rupture.

Tableau 6.13 – Modèles de fatigue $N_{1/2}$ en fonction de la déformation ϵ ($\mu\text{m/m}$) et de la rigidité E (MPa) pour les enrobés MB-16.

T°C	Modèle	R ²	σ	D.L.
5	$N_{1/2} = 8,14 \cdot 10^{16} \epsilon^{-4,51}$	0,75	0,271	19
	$N_{1/2} = 5,01 \cdot 10^{25} \epsilon^{-4,72} E^{-2,03}$	0,78	0,256	18
15	$N_{1/2} = 5,34 \cdot 10^{13} \epsilon^{-3,30}$	0,59	0,317	19
	$N_{1/2} = 2,70 \cdot 10^{23} \epsilon^{-3,69} E^{-2,26}$	0,77	0,244	18

Tableau 6.14 – Modèles de fatigue N_r en fonction de la déformation ϵ ($\mu\text{m/m}$) et de la rigidité E (MPa) pour les enrobés MB-16.

T°C	Modèle	R ²	σ	D.L.
5	$N_r = 1,88 \cdot 10^{16} \epsilon^{-4,25}$	0,71	0,277	19
	$N_r = 5,11 \cdot 10^{25} \epsilon^{-4,48} E^{-2,18}$	0,76	0,260	18
15	$N_r = 6,89 \cdot 10^{12} \epsilon^{-2,90}$	0,58	0,286	19
	$N_r = 8,59 \cdot 10^{21} \epsilon^{-3,27} E^{-2,12}$	0,78	0,213	18

Tel que constaté pour les équations de fatigue individuelles des tableaux 6.7 et 6.8, on observe que la pente des modèles aux tableaux 6.13 et 6.14 est différente pour les deux températures en

passant d'environ $-4,4$ pour 5°C à $-3,1$ pour 15°C . La faible valeur de R^2 à 15°C pour le modèle général de forme classique est attribuable à l'équation de fatigue de l'enrobé formulé avec le bitume 80/100 dont la pente est de $-1,6$. Cette faible valeur de pente contribue largement à diminuer la valeur de la pente du modèle général à cette température $(-3,1)$. L'ajout de la valeur de E aux modèles semble améliorer leur précision, particulièrement à 15°C . Par ailleurs, le R^2 des modèles développés ne dépasse pas 80% et la pente demeure faible, ce qui donne peu de crédibilité à ce modèle.

Suite aux observations sur la fissuration du site de l'autoroute 10, la valeur de l'angle de phase a été identifiée comme un paramètre important pour caractériser la résistance à la fatigue des enrobés. L'angle de phase permet de compléter l'information fournie par la valeur de rigidité. Pour le développement des nouveaux modèles présentés aux tableaux 6.15 et 6.16, deux approches ont été employées pour l'introduction de la valeur de l'angle de phase dans les modèles, soit simplement par l'ajout de sa valeur à la valeur de la rigidité ou par l'ajout de la définition de la partie réelle et imaginaire du module complexe : $E \sin \varphi$ et $E \cos \varphi$.

Tableau 6.15 – Modèles de fatigue $N_{1/2}$ en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$), de la rigidité E (MPa) et de l'angle de phase φ ($^{\circ}$) pour les enrobés MB-16.

T $^{\circ}\text{C}$	Modèles	R 2	σ	D.L.
5	$N_{1/2} = 1,18 \cdot 10^{99} \varepsilon^{-5,27} E^{-17,1} \varphi^{-10,1}$	0,89	0,190	17
	$N_{1/2} = 1,66 \cdot 10^{79} \varepsilon^{-5,25} [E \sin \varphi]^{-10,2} [E \cos \varphi]^{-6,48}$	0,89	0,192	17
15	$N_{1/2} = 3,32 \cdot 10^{48} \varepsilon^{-4,15} E^{-6,36} \varphi^{-5,90}$	0,87	0,186	17
	$N_{1/2} = 6,30 \cdot 10^{37} \varepsilon^{-4,15} [E \sin \varphi]^{-6,26} [E \cos \varphi]^{-0,065}$	0,87	0,188	17

Tableau 6.16 – Modèles de fatigue N_r en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$), de la rigidité E (MPa) et de l'angle de phase φ ($^{\circ}$) pour les enrobés MB-16.

T $^{\circ}\text{C}$	Modèles	R 2	σ	D.L.
5	$N_r = 2,58 \cdot 10^{97} \varepsilon^{-5,01} E^{-16,9} \varphi^{-9,84}$	0,87	0,199	17
	$N_r = 1,06 \cdot 10^{78} \varepsilon^{-4,99} [E \sin \varphi]^{-9,95} [E \cos \varphi]^{-6,52}$	0,87	0,201	17
15	$N_r = 9,91 \cdot 10^{37} \varepsilon^{-3,56} E^{-4,74} \varphi^{-3,77}$	0,83	0,190	17
	$N_r = 1,13 \cdot 10^{31} \varepsilon^{-3,56} [E \sin \varphi]^{-4,11} [E \cos \varphi]^{-0,605}$	0,83	0,191	17

On constate que l'ajout de l'angle de phase aux modèles augmente leur précision et rapproche la valeur de la pente de celles des relations de Whöler. Ce constat semble indiquer que l'angle

de phase complète effectivement l'information donnée par la rigidité au sujet de la résistance à la fatigue. On remarque également que les deux approches pour introduire la valeur de l'angle de phase dans le modèle donnent la même précision, ce qui semble indiquer que les deux types de modèles sont équivalents.

6.7.4 Modèles de fatigue généraux

Bien que la distribution de la résistance à la fatigue en fonction de la température ne soit pas caractérisée dans le cadre de cette étude, il est tout de même intéressant d'étendre l'application de l'angle de phase au développement de modèles généraux couvrant une certaine plage de température. Dans ce cas, l'effet de la température peut être pris en compte simplement par les valeurs de rigidité et d'angle de phase qui sont uniques pour chaque combinaison de température, de fréquence et de types d'enrobés. On retrouve ces modèles aux tableaux 6.17 et 6.18 ainsi que leur coefficient de détermination R^2 , leur écart-type σ et leur degré de liberté DL.

Tableau 6.17 – Modèles de fatigue $N_{1/2}$ généraux en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$), de la rigidité E (MPa) et de l'angle de phase φ ($^\circ$) pour les enrobés MB-16.

Modèles	R^2	σ	D.L.
$N_{1/2} = 1,83 \cdot 10^{18} \varepsilon^{-4,01} E^{-0,67}$	0,69	0,284	39
$N_{1/2} = 1,51 \cdot 10^{42} \varepsilon^{-4,35} E^{-5,38} \varphi^{-3,62}$	0,82	0,220	38
$N_{1/2} = 1,25 \cdot 10^{34} \varepsilon^{-4,32} [E \sin \varphi]^{-3,61} [E \cos \varphi]^{-1,37}$	0,81	0,225	38

Tableau 6.18 – Modèles de fatigue N_r généraux en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$), de la rigidité E (MPa) et de l'angle de phase φ ($^\circ$) pour les enrobés MB-16.

Modèles	R^2	σ	D.L.
$N_r = 9,53 \cdot 10^{18} \varepsilon^{-3,70} E^{-1,03}$	0,70	0,258	39
$N_r = 5,73 \cdot 10^{36} \varepsilon^{-3,96} E^{-4,53} \varphi^{-2,69}$	0,79	0,222	38
$N_r = 3,70 \cdot 10^{30} \varepsilon^{-3,93} [E \sin \varphi]^{-2,71} [E \cos \varphi]^{-1,49}$	0,78	0,226	38

On constate que l'ajout de l'angle de phase dans la caractérisation augmente effectivement la précision des modèles puisque le R^2 passe d'environ 70% à 80%. Par ailleurs, ces modèles ne peuvent pas être recommandés pour la conception puisqu'ils représentent une influence de la température qui n'a pas été caractérisée.

6.8 Recommandations

La caractérisation de différents enrobés MB-16 associés à un site expérimental a permis d'évaluer le potentiel de l'essai de résistance à la fatigue pour le classement des enrobés en fonction de leur performance sur la route. De plus, l'influence du type de bitume employé pour la formulation a été étudiée ce qui a permis d'élaborer des modèles généraux différents de ceux développés lors de la caractérisation d'enrobés de base ESG-14 et GB-20 qui se concentraient sur l'influence de la température. La quantité limitée d'essais effectués n'a pas permis de caractériser l'influence de la température et de la granulométrie sur le comportement de cet enrobé. L'influence de la température a été étudiée à 5 et 15°C qui sont considérées dans le cadre de cette étude comme la température critique et la température effective pour la caractérisation de l'endommagement par fatigue au Québec. Une seule granulométrie a été considérée.

6.8.1 Rigidité et angle de phase

Les valeurs de rigidité E et d'angle de phase ϕ obtenues par l'essai de balayage de fréquence qui semblent pertinentes pour la conception sont présentées au tableau 6.19 pour des températures de 5 et 15°C et une fréquence de 10 Hz. Le tableau 6.20 rappelle les modèles recommandés pour estimer la rigidité E des enrobés MB-16 au tableau 6.5 en fonction de la fréquence et de la température. Le coefficient de détermination R^2 , l'écart type σ ainsi que le degré de liberté DL de l'équation sont également indiqués. Les modèles sont individuels en fonction du type de bitume puisque le paramètre pour considérer l'influence du bitume dans le modèle est inconnu dans le cadre de cette étude. Par ailleurs, bien que l'on dispose uniquement d'informations sur deux températures, les modèles sont fonction de la température et de la fréquence puisque l'on estime que la relation en fonction de la température est linéaire basée sur les observations faites sur l'enrobé GB-20.

Tableau 6.19 – Valeurs de rigidité E (MPa) et d'angle de phase ϕ (°) mesurées à 5 et 15°C et 10 Hz pour les enrobés MB-16.

Bitume	5°C		15°C	
	E	ϕ	E	ϕ
80/100	13 420	8,8	9 450	19,1
MG 90	11 240	11,5	7 030	22,5
150/200	11 700	11,9	6 960	26,6
MG 175	9 580	14,7	5 150	29,0

Tableau 6.20 – Modèles de rigidité E (MPa) en fonction de la température T (°C) et de la fréquence fr (Hz) pour les enrobés MB-16.

Bitume	Modèle	R ²	σ	D.L.
80/100	$E = 10^{(4,12 - 0,023 T)} fr^{0,117}$	0,91	0,045	21
MG 90	$E = 10^{(4,04 - 0,027 T)} fr^{0,148}$	0,94	0,044	21
150/200	$E = 10^{(4,04 - 0,031 T)} fr^{0,179}$	0,93	0,054	21
MG 175	$E = 10^{(3,94 - 0,034 T)} fr^{0,201}$	0,94	0,056	21

En ce qui concerne la valeur du module élastique pour l'ensemble des enrobés MB-16 caractérisés, il est difficile de déterminer sa valeur basée sur la caractérisation de deux températures uniquement. Par ailleurs, on peut estimer que sa valeur se rapproche sensiblement de celle de l'enrobé GB-20. Ainsi, basé sur l'ensemble des résultats obtenus pour les deux études, on considère que le module élastique des enrobés est d'environ 16 000 MPa.

À la lumière des résultats obtenus, il est recommandé de caractériser la rigidité et l'angle de phase par des essais de balayage de fréquence couvrant une grande quantité de température. Ceci est possible puisque l'on effectue autant d'essais que l'on désire sur une poutre dans un laps de temps relativement court. Par exemple, on peut envisager des températures de 0, 5, 10, 15, 20, 25 et 30°C tout en conservant les fréquences de 1, 3, 10 et 30 Hz. Si l'on veut abréger la routine, il est recommandé de caractériser au minimum les températures de 5, 15 et 25°C.

6.8.2 Résistance à la fatigue

La résistance à la fatigue des enrobés MB-16 a été caractérisée pour des températures de 5 et 15°C et une fréquence de 10 Hz. Les modèles présentés au tableau 6.21 sont un rappel des modèles individuels proposés pour la conception en fonction de la température puisque l'on ne connaît pas la forme de la distribution de la résistance à la fatigue de l'enrobé autour de ces deux températures.

Tableau 6.21 – Modèles de fatigue généraux en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$), de la rigidité E (MPa) et de l'angle de phase φ ($^\circ$) pour les enrobés MB-16.

T $^\circ\text{C}$	Modèles	R 2	σ	D.L.
5	$N_{1/2} = 1,18 \cdot 10^{99} \varepsilon^{-5,27} E^{-17,1} \varphi^{-10,1}$	0,89	0,190	17
	$N_r = 2,58 \cdot 10^{97} \varepsilon^{-5,01} E^{-16,9} \varphi^{-9,84}$	0,87	0,199	17
15	$N_{1/2} = 3,32 \cdot 10^{48} \varepsilon^{-4,15} E^{-6,36} \varphi^{-5,90}$	0,87	0,186	17
	$N_r = 9,91 \cdot 10^{37} \varepsilon^{-3,56} E^{-4,74} \varphi^{-3,77}$	0,83	0,190	17

Si l'on désire caractériser l'influence de la température, il est recommandé d'envisager au minimum trois températures pour la caractérisation, tel que 5, 15 et 25 $^\circ\text{C}$, afin d'évaluer s'il y a un gain de résistance à la fatigue à basse température ou une perte à haute température au niveau des températures intermédiaires. D'autre part, les modèles présentés sont uniques en fonction du type de bitume puisqu'il semble que l'intégration des valeurs de rigidité et d'angle de phase de l'enrobé dans les modèles décrivent adéquatement l'influence du bitume sur la résistance à la fatigue. Les coefficients de détermination R^2 , les écarts-type σ ainsi que les degrés de liberté DL obtenus confirment cette hypothèse. De plus, la pente des modèles semble représentative des relations de Whöler individuelles, ce qui est un bon indicateur de la qualité de ces modèles.

Les modèles basés sur la définition alternative de la rupture N_r semblent donner la même précision que les modèles basés sur la définition de la rupture selon la norme $N_{1/2}$ contrairement à la caractérisation de l'enrobé GB-20. Ainsi, il est recommandé d'employer la définition alternative de la rupture N_r puisqu'elle permet d'éviter de tenir compte de la période d'échauffement au début de l'essai. La définition de N_r employée conjointement avec la définition alternative de la rigidité initiale S_0 semble fournir un rapport S_r/S_0 constant d'environ 45%. Ainsi, il semble possible de sortir l'influence de la température, associée à l'ampleur de la période d'échauffement, de la définition de la rupture par fatigue en laboratoire.

6.8.3 Classement des enrobés en fonction de leur résistance à la fatigue

La caractérisation d'enrobés MB-16 associés à un site expérimental a permis d'évaluer l'influence de quatre types de bitume sur la rigidité, l'angle de phase et la résistance à la fatigue de l'enrobé. En ce qui concerne la rigidité et l'angle de phase, les résultats sont généralement conformes aux attentes. Par ailleurs, en ce qui concerne la résistance à la fatigue, la caractérisation en laboratoire et les observations sur le site sont quelque peu différentes.

La caractérisation en laboratoire de la résistance à la fatigue semble indiquer que les enrobés formulés avec les bitumes modifiés MG 90 et MG 175 présentent une résistance supérieure. Par ailleurs, le suivi de la fissuration par fatigue sur le site expérimental a indiqué que ce sont les enrobés formulés avec des bitumes de pénétration 150/200 qui ont mieux résistés. Ainsi, un classement uniquement basé sur les modèles de fatigue développés en laboratoire ne semble pas identifier les enrobés les plus résistants à la dégradation par fatigue sur la route.

De même, une analyse comparative entre les enrobés basée sur la déformation anticipée en fonction de leur rigidité et la déformation admise ϵ_6 , ne permet pas d'estimer adéquatement la résistance à la fatigue sur la route. Une lacune majeure de cette approche est qu'elle ne tient pas compte de l'information fournie par la valeur de l'angle de phase. Il semble y avoir un lien entre un angle de phase élevé et un indice de pénétration élevé, qui semblent tous deux indiquer que l'enrobé résiste mieux à la fissuration par fatigue sur la route. Ainsi, dans le cadre de cette étude, il semble que les enrobés avec un angle de phase supérieur à 25° pour une température de 15°C et un indice de pénétration de 150/200 performant mieux en fatigue sur la route.

Le fait de ne pas constater l'influence de l'angle de phase et de la pénétration sur la résistance à la fatigue en laboratoire semble indiquer que leur influence se situe plutôt au niveau de la route. Par exemple, il est possible que l'influence d'un angle de phase et d'une pénétration élevés se traduise par un effet de post compaction plus important sur la route pour ces enrobés, ce qui se traduit par une augmentation de leur résistance à la fatigue. Cet effet n'a pas été

étudié dans le cadre de cette étude et peut constituer une avenue intéressante pour les travaux futurs.

6.8.4 Essai de flexion de poutres aux tiers points

Suite au constat sur la difficulté pour l'essai de flexion de poutre aux tiers points à classer les enrobés en fonction de leur performance en fatigue sur la route, il semble pertinent d'amener quelques recommandations concernant l'essai proprement dit. Dans un premier temps, les recommandations portent sur l'incidence de la précision des essais de fatigue sur l'analyse des résultats. Par la suite, certaines appréhensions sont émises au sujet de l'influence de la configuration de l'essai de flexion de poutres aux tiers points sur les résultats obtenus.

En ce qui concerne les relations de Whöler caractérisées, bien que l'écart type des relations et des valeurs ε_6 extrapolées semble acceptable, la faible quantité d'essais effectués pour caractériser les relations limite le degré de confiance que l'on peut leur attribuer. Ainsi, il est possible que les valeurs de ε_6 ne soit pas suffisamment précises pour effectuer le genre d'analyse proposée. Pour augmenter la précision des valeurs de ε_6 , il faudrait augmenter la quantité de répliques à chaque niveau de déformation caractérisé et/ou ajouter des niveaux de déformation.

Par ailleurs, les niveaux de déformation caractérisés en laboratoire sont plus élevés que les niveaux de déformation mesurés sur la route. L'essai de FWD « Falling Weight Deflectometer » indique que la déformation en tension à la base des quatre types de revêtements de l'autoroute 10 est en moyenne d'environ 200 $\mu\epsilon$ lorsque la température de l'enrobé est de 15°C. Les déformations appliquées en laboratoire se situent généralement entre 450 et 700 $\mu\epsilon$ à haut niveau de déformation, environ 35 000 cycles à la rupture, et entre 250 et 400 $\mu\epsilon$ à faible niveau de déformation, environ 350 000 cycles à la rupture. Ainsi, lorsque l'on désire connaître le nombre de cycle associé aux niveaux de déformation mesurés sur la route, on extrapole la relation de Whöler par une expression linéaire dans un plan bilogarithmique. Il est possible que cette relation présente en réalité une légère courbure vers une asymptote

indiquant un niveau de déformation minimal, nécessaire pour engendrer de la fissuration par fatigue. Pour éviter les erreurs d'extrapolation, on devrait effectuer la caractérisation avec des niveaux de déformation qui se rapprochent le plus possible des niveaux de déformation observés sur la route.

En ce qui concerne l'essai de flexion de poutre aux tiers points, le chargement cyclique est appliqué de manière continue, ce qui ne correspond pas au passage irrégulier des véhicules sur la route. Il existe un processus largement reconnu, bien que mal documenté, d'autoréparation des fissures dans l'enrobé entre le passage des véhicules. Cette propriété de l'enrobé est certainement influencée par le type de bitume employé. Par exemple, un bitume plus mou peut avoir tendance à s'autoréparer plus aisément qu'un enrobé plus dur. Pour tenir compte de cette réalité, il est recommandé d'étudier la possibilité d'inclure des périodes de repos entre les chargements en laboratoire.

Un autre aspect de la configuration de l'essai est qu'il ramène la poutre à sa position initiale à la fin de chaque cycle de chargement. Cette approche ne représente pas le mode de chargement de l'enrobé sur la route qui subit une déformation lors du passage d'un véhicule et qui revient à sa position initiale sans qu'un effort ne soit appliqué. Le temps nécessaire pour que l'enrobé revienne à sa position initiale (temps de relaxation) peut certainement varier en fonction du type de bitume. Par exemple, un enrobé avec un angle de phase plus élevé peut nécessiter plus de temps qu'un enrobé avec un angle de phase plus faible pour revenir à sa position initiale. Cet aspect n'est aucunement pris en compte par l'essai de flexion. Pour caractériser l'enrobé en ce sens, il faudrait effectuer des essais de type réversible pour la caractérisation de la fatigue des enrobés. Par ailleurs, l'essai de flexion de poutre est conçu de telle manière qu'il n'est pas possible d'effectuer des essais réversibles où l'on mesure uniquement le retour élastique. Ainsi, on doit oublier cette approche pour les essais de flexion aux tiers points.

7. DEVELOPPEMENT DE MODELES GLOBAUX ET COMPARAISON AVEC LES MODELES DE LA LITTERATURE

Basé sur les recommandations issues de la caractérisation des enrobés de base ESG-14 et GB-20 et des enrobés MB-16 du site expérimental de l'autoroute 10, le développement de modèles globaux tenant compte de l'ensemble des résultats obtenus est présenté. Ces modèles ainsi que ceux recommandés aux chapitres 5 et 6 sont comparés aux modèles proposés dans la littérature qui semblent les plus pertinents pour la conception des chaussées au Québec.

7.1 Modèles globaux

Des modèles globaux ont été développés à partir des résultats obtenus lors de la caractérisation des enrobés GB-20 et MB-16 et des recommandations émises à leur sujet. Les données obtenues de la caractérisation des enrobés ESG-14 ne sont pas employées puisque les valeurs de rigidité et d'angle de phase dynamique mesurées par essai de balayage de fréquence sont inconnues. Des essais supplémentaires ont été effectués sur le bitume afin de caractériser des paramètres additionnels pour décrire l'influence du type de bitume sur le comportement de l'enrobé.

7.1.1 Influence du bitume

Le bitume a été identifié comme un paramètre d'influence majeur sur la caractérisation de la rigidité, de l'angle de phase et de la résistance à la fatigue des enrobés. Il est reconnu que la dégradation par fatigue des enrobés se produit dans des conditions de température et de vitesse de chargement dites intermédiaires. Ainsi, un paramètre pertinent pour représenter adéquatement l'influence du type de bitume sur ce processus de dégradation doit donc idéalement être mesuré pour ces mêmes conditions intermédiaires. Présentement, aucun essai de caractérisation n'est prévu par la norme 2101 « Bitumes » pour caractériser le bitume aux conditions intermédiaires. Ainsi, il est difficile d'inclure l'influence du bitume dans les modèles développés. L'unique information disponible au sujet du bitume pour des conditions

intermédiaires dans le cadre de l'étude sur l'autoroute 10 est l'indice de pénétration mesuré à 25°C. Cet indice a permis de classer les enrobés en fonction de leur résistance à la fatigue observée sur le site. Par ailleurs, cet essai n'est pas exigé par la norme 2101.

Les deux essais principaux prévus par la norme 2101 sont l'essai avec le rhéomètre à cisaillement dynamique DSR « Dynamic Shear Rheometer » pour caractériser le PG à haute température et l'essai avec le rhéomètre de flexion de poutre BBR « Bending Beam Rheometer » pour caractériser le PG à basse température. Ces deux essais semblent intéressants pour les études de résistance à la fatigue puisque le DSR est un essai dynamique, donc qui permet de caractériser la valeur de la rigidité et de l'angle de phase du bitume, et le BBR est un essai de flexion de poutre, donc qui permet de caractériser le bitume pour une sollicitation en tension par flexion. Par ailleurs, uniquement la configuration de l'essai DSR permet une caractérisation du bitume à des conditions de chargement et de température intermédiaires.

Ainsi, on retrouve au tableau 7.1 les valeurs de rigidité E_b et d'angle de phase ϕ_b en cisaillement des bitumes associées aux valeurs de rigidité E et d'angle de phase ϕ en tension par flexion des enrobés correspondants. Les valeurs présentées ont été mesurées sur le bitume vieilli à court terme par la méthode du RTFOT « Rolling Thin Film Oven Test ». Les essais DSR ont été effectués en 1998, ce qui signifie que le bitume a subi également un vieillissement lors de son entreposage, tel que discuté à la section 6.3.2. La sollicitation au DSR a été appliquée de manière à ne pas endommager l'échantillon, donc afin de mesurer la rigidité maximale et l'angle de phase minimal du bitume.

Tableau 7.1 – Valeurs de rigidité E (MPa) et d'angle de phase φ (°) en tension pour les enrobés GB-20 et MB-16 ainsi que les valeurs de rigidité E_b (kPa) et d'angle de phase φ_b (°) en cisaillement pour les bitumes correspondants.

Type d'enrobé	5°C				15°C			
	Enrobé		Bitume		Enrobé		Bitume	
	E (MPa)	φ	E_b (kPa)	φ_b	E (MPa)	φ	E_b (kPa)	φ_b
GB-20 conventionnel	9 840	11,9	10 580	11,4	6 530	23,3	4 680	32,9
GB-20 polymère	7 240	17,8	7 660	19,2	3 790	31,4	2 950	40,2
MB-16 80/100	13 420	8,8	9 390	10,0	9 450	19,1	5 280	27,1
MB-16 MG 90	11 240	11,5	8 240	14,3	7 030	22,5	4 640	27,6
MB-16 150/200	11 700	11,9	8 500	16,5	6 960	26,6	3 490	38,3
MB-16 MG 175	9 580	14,7	6 610	21,8	5 150	29,0	2 260	39,2

Les informations sur le bitume fournies pour l'essai DSR permettent d'apprécier le rôle de l'angle de phase sur la fissuration par fatigue. En effet, dans le cas de l'enrobé MB-16, on constate que les bitumes 150/200 et MG 175, qui ont présenté une meilleure performance en fatigue sur la route, présentent des angles de phase plus élevés que les bitumes 80/100 et MG 90, ce qui concorde avec les recommandations sur le classement des enrobés au chapitre 6. De plus, on constate que le bitume polymère, bitume généralement considéré comme offrant une bonne performance face à la fissuration, présente également un angle de phase élevé.

En ce qui concerne les valeurs de rigidité, bien que leurs valeurs soient différentes par un facteur de 1 000 entre l'enrobé et le bitume, on observe que le classement est le même. Ainsi, la caractérisation du bitume à l'aide de l'essai DSR effectuée aux mêmes températures que l'essai de flexion de poutre aux tiers points sur les enrobés donne sensiblement la même information, bien que le mode de sollicitation soit différent. On constate que le bitume polymère et MG 175 présentent une faible rigidité tout comme les enrobés formulés avec ces bitumes. Ainsi, il semble possible de développer des critères sur la sélection des bitumes en fonction de leur résistance à la fatigue. Puisque l'on sait que les enrobés formulés avec les bitumes 150/200 et MG 175 résistent mieux à la fatigue et qu'il est fort probable que l'enrobé GB-20 formulé avec le bitume polymère résiste également bien, les critères pour la sélection des bitumes pourraient consister en un angle de phase supérieur à 35° et une rigidité inférieure à 4 000 kPa pour une température de 15°C.

7.1.2 Rigidité et angle de phase

Basé sur les résultats obtenus pour la caractérisation des bitumes à l'aide de l'essai DSR à des températures intermédiaires, il est maintenant possible de développer des modèles globaux tenant compte de l'influence du type de bitume sur la rigidité et l'angle de phase de l'enrobé. Le tableau 7.2 rappelle les modèles généraux de rigidité développés pour les enrobés GB-20 et MB-16 aux chapitres 5 et 6 ainsi que propose d'ajouter à ces modèles les valeurs de rigidité E_b et d'angle de phase φ_b des bitumes mesurées aux températures correspondantes. De plus, on retrouve des modèles globaux, avec et sans les valeurs de rigidité et d'angle de phase des bitumes, pour décrire l'ensemble des résultats obtenus pour les enrobés GB-20 et MB-16. Au tableau 7.3, ces modèles sont reproduits pour décrire l'angle de phase de l'enrobé.

Tableau 7.2 – Modèles de rigidité E (MPa) généraux et globaux en fonction de la température T (°C), de la fréquence f_r (Hz) et de la rigidité E_b (kPa) et de l'angle de phase φ_b en cisaillement des bitumes pour les enrobés GB-20 et MB-16.

Enrobé	Modèle	R^2	σ	D.L.
GB-20	$E = 10^{(3,89 - 0,035 T)} f_r^{0,234}$	0,79	0,123	93
	$E = 10^{(0,016 T - 1,07)} f_r^{0,234} E_b^{1,18} \varphi_b^{0,018}$	0,96	0,055	91
MB-16	$E = 10^{(4,04 - 0,029 T)} f_r^{0,162}$	0,76	0,097	93
	$E = 10^{(1,87 - 0,003 T)} f_r^{0,162} E_b^{0,578} \varphi_b^{-0,185}$	0,92	0,058	91
Global	$E = 10^{(4,00 - 0,035 T)} f_r^{0,198}$	0,73	0,136	189
	$E = 10^{(1,42 - 0,0005 T)} f_r^{0,198} E_b^{0,691} \varphi_b^{-0,268}$	0,85	0,103	187

Tableau 7.3 – Modèles d'angle de phase φ (°) généraux et globaux en fonction de la température T (°C), de la fréquence f_r (Hz) et de la rigidité E_b (kPa) et de l'angle de phase φ_b en cisaillement des bitumes pour les enrobés GB-20 et MB-16.

Enrobé	Modèle	R^2	σ	D.L.
GB-20	$\varphi = 10^{(1,23 + 0,022 T)} f_r^{-0,175}$	0,80	0,079	93
	$\varphi = 10^{(2,51 - 0,013 T)} f_r^{-0,175} E_b^{-0,425} \varphi_b^{0,492}$	0,96	0,037	91
MB-16	$\varphi = 10^{(1,10 + 0,028 T)} f_r^{-0,192}$	0,69	0,111	93
	$\varphi = 10^{(0,598 + 0,006 T)} f_r^{-0,182} E_b^{-0,033} \varphi_b^{0,625}$	0,80	0,089	91
Global	$\varphi = 10^{(1,15 + 0,026 T)} f_r^{-0,185}$	0,73	0,103	189
	$\varphi = 10^{(0,808 - 0,00004 T)} f_r^{-0,178} E_b^{-0,083} \varphi_b^{0,672}$	0,85	0,078	187

On constate que l'ajout des valeurs de rigidité E_b et d'angle de phase φ_b des bitumes augmente sensiblement la précision des modèles développés pour estimer la valeur de la rigidité E et de l'angle de phase φ des enrobés. Dans une approche généraliste, ces modèles semblent envisageables, bien qu'ils ne tiennent aucunement compte de l'influence de la granulométrie

pour ne nommer que ce facteur. Par ailleurs, la caractérisation de la rigidité et de l'angle de phase des enrobés étant un processus relativement simple, court et peu coûteux en laboratoire, il est suggéré de toujours effectuer les essais de balayage de fréquence sur les enrobés avant la conception d'une chaussée.

7.1.3 Résistance à la fatigue

La caractérisation des enrobés de base ESG-14 et GB-20 en fonction de la température et des enrobés MB-16 de l'autoroute 10 en fonction du type de bitume a permis d'identifier la température, la rigidité et l'angle de phase de l'enrobé comme des paramètres à inclure dans la description des modèles de fatigue généraux et éventuellement globaux. Au tableau 7.4 on retrouve des modèles généraux pour les enrobés GB-20 et MB-16 ainsi que des modèles globaux comprenant tous ces paramètres dans leur description. La rigidité E et l'angle de phase ϕ à employer avec les modèles peuvent être mesurés avec un essai de balayage de fréquence ou estimés par un des modèles présentés aux tableaux 7.2 et 7.3. La valeur de rigidité et d'angle de phase employée correspond à la température à laquelle on désire connaître le nombre de cycles à la rupture.

Tableau 7.4 – Modèles de fatigue généraux et globaux en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$), de la température T ($^{\circ}\text{C}$), de la rigidité E (MPa) et de l'angle de phase ϕ ($^{\circ}$) pour les enrobés GB-20 et MB-16.

Enrobé	Modèle	R^2	σ	DL
GB-20	$N_{1/2} = 10^{(37,2 - 0,088 T - 0,001 T^2)}$ $\varepsilon^{-4,60} E^{-5,39} \phi^{1,16}$	0,90	0,182	41
	$N_r = 10^{(34,3 - 0,025 T - 0,003 T^2)}$ $\varepsilon^{-4,11} E^{-5,07} \phi^{1,31}$	0,79	0,257	41
MB-16	$N_{1/2} = 10^{(41,6 - 0,004 T)}$ $\varepsilon^{-4,35} E^{-5,29} \phi^{-3,44}$	0,82	0,222	37
	$N_r = 10^{(36,5 - 0,002 T)}$ $\varepsilon^{-3,96} E^{-4,50} \phi^{-2,62}$	0,79	0,225	37
Global	$N_{1/2} = 10^{(24,5 - 0,055 T + 0,001 T^2)}$ $\varepsilon^{-3,20} E^{-2,54} \phi^{-0,60}$	0,61	0,332	83
	$N_r = 10^{(24,4 - 0,006 T - 0,001 T^2)}$ $\varepsilon^{-2,85} E^{-2,77} \phi^{-0,69}$	0,56	0,339	83

Les modèles généraux pour les enrobés GB-20 et MB-16 semblent envisageables pour les études de conception préliminaires. La précision de ces modèles est comparable aux modèles pour l'enrobé GB-20 proposés individuellement en fonction du type de bitume aux tableaux 5.14 et 5.15 et aux modèles pour l'enrobé MB-16 proposés individuellement en fonction de la température aux tableaux 6.15 et 6.16. Ainsi, cette approche des modèles généraux avec

l'intégration de la température, de la rigidité et de l'angle de phase des enrobés semble permettre de couvrir un ensemble de facteur influençant la résistance à la fatigue d'un type d'enrobé avec une précision acceptable.

Par ailleurs, la précision des modèles globaux ne semble pas intéressante pour la conception. En effet, il semble que le développement d'un modèle unique pour caractériser différents enrobés doive inclure un ou plusieurs paramètres pour décrire l'influence de la granulométrie. La granulométrie influence principalement la volumétrie de l'enrobé que l'on peut décrire par des paramètres tels que la teneur en bitume, la densité maximale, le degré de compacité, le volume de bitume effectif, le volume de vides intergranulaire, le volume de vides comblés par le bitume et ainsi de suite. Avec uniquement deux types d'enrobés de volumétries différentes, il est difficile de se prononcer sur ces différents paramètres.

7.2 Étude comparative avec les modèles de la littérature

Suite au développement de plusieurs modèles décrivant la rigidité, l'angle de phase et la résistance à la fatigue de différents enrobés, il est essentiel de comparer les résultats obtenus avec les modèles présentés dans la littérature. Pour les fins de la comparaison, uniquement les modèles de la littérature les plus reconnus et généraux seront employés, ce qui limite beaucoup la quantité de modèles à vérifier. En effet, plusieurs agences ont développé des modèles simples qui s'appliquent difficilement à l'extérieur de leur contexte puisqu'ils sont basés sur un nombre limité de résultats. Les modèles utilisés pour l'étude comparative sont ceux recommandés à la fin des chapitres 5 et 6 ainsi que les modèles globaux développés dans ce chapitre.

7.2.1 Rigidité

La majorité des modèles de rigidité disponibles dans la littérature se contentent d'employer la température comme paramètre d'influence. Ce type de modèle ne tient pas compte de l'influence de la granulométrie et du bitume sur la valeur de rigidité, ce qui les rend

inutilisables hors de leur contexte de développement. Si l'on est intéressé par ce type de modèle pour estimer une valeur générale, il est recommandé d'employer un modèle développé à partir d'enrobés semblables à celui que l'on cherche à caractériser.

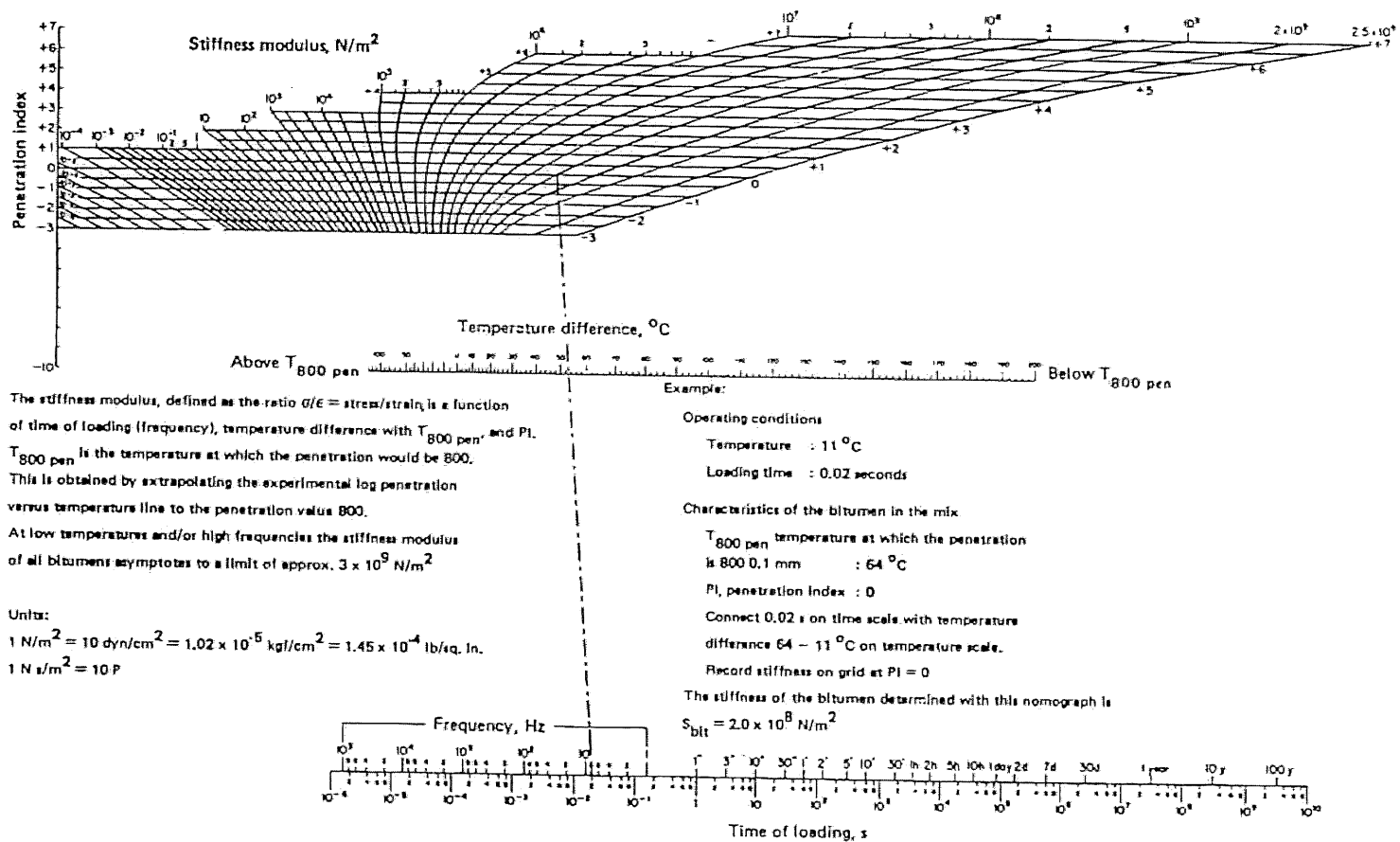
Par ailleurs, il existe quelques modèles plus complets qui permettent de tenir compte du type d'enrobé étudié. Une approche largement répandue consiste, dans un premier temps, en l'utilisation du « nomographe » représenté à la figure 7.1 pour déterminer la rigidité du bitume en fonction de la fréquence et de la température [Van der Poel 1954]. Pour employer ce nomographe on doit connaître la température à laquelle la pénétration du bitume est de 800, température mesurée par l'essai de bille et anneau T_{800} , et l'indice de pénétration PI « Pénétration Index » déterminé selon l'équation 7.1. Par la suite, on détermine la rigidité de l'enrobé basé sur la rigidité du bitume à partir du nomographe de la figure 7.2 ou de l'équation 7.2 développée par Bonnaure & al [Bonnaure & al 1977]. Le nomographe et l'équation sont fonction des proportions volumétriques de bitume V_b et de granulat V_g . Cette approche se retrouve dans le guide de conception routière de la compagnie pétrolière Shell [Shell 1978].

$$PI = \frac{20 - 500 A}{1 + 50 A} \quad (7.1)$$

$$A = \frac{\log(\text{pen à } T_1) - \log(\text{pen à } T_2)}{(T_1 - T_2)}$$

T_1, T_2 = température à laquelle est mesurée la pénétration (°C)

Figure 7.1 – Nomographe pour déterminer la rigidité des bitumes [Van der Poel 1954]



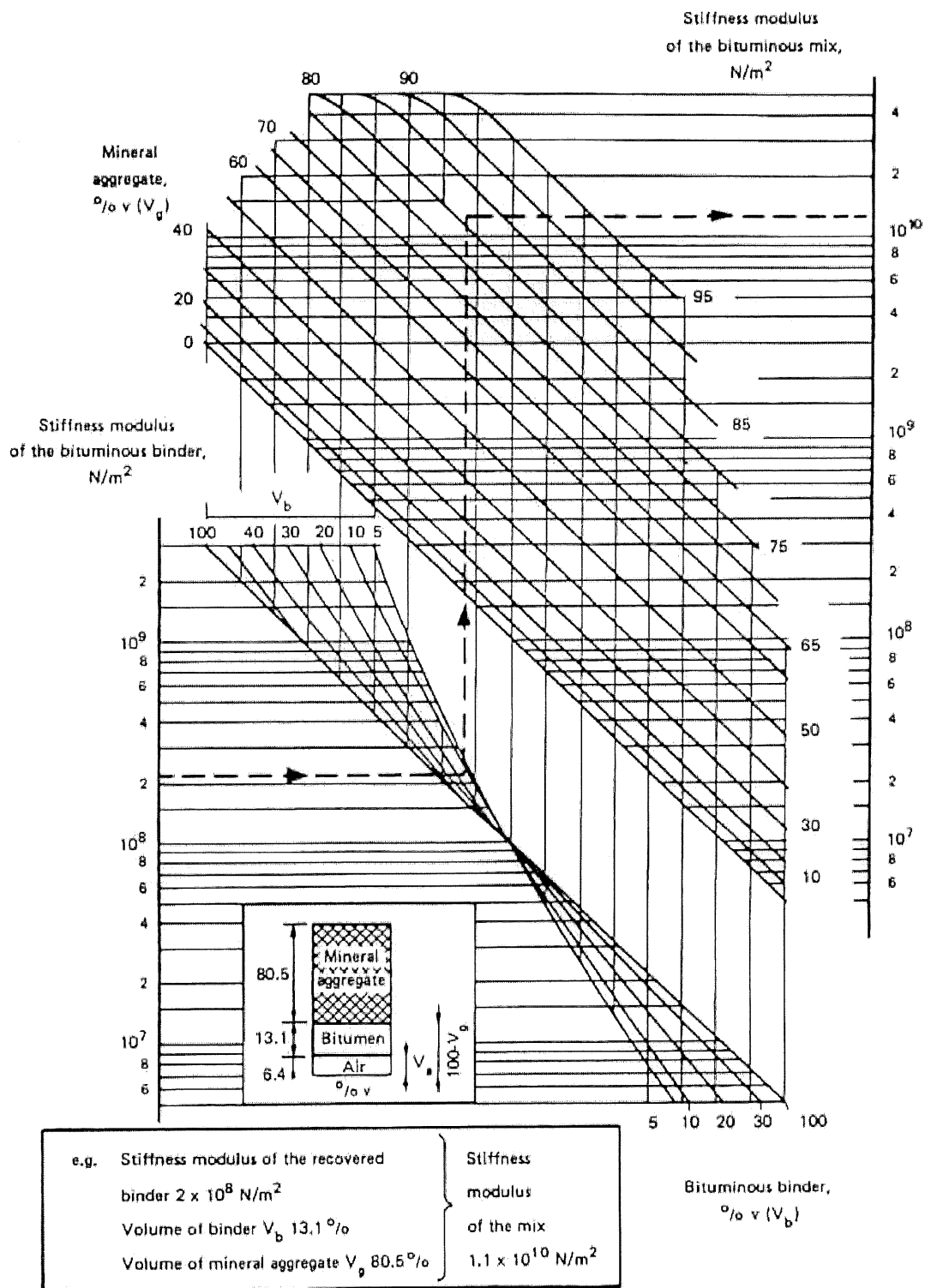


Figure 7.2 – Nomographe pour déterminer la rigidité des enrobés [Shell 1978].

$$\text{Log } E = \frac{K_4 + K_3}{2} (\log E - 8) + \frac{K_4 - K_3}{2} |\log E - 8| + K_2 \quad (7.2)$$

$$K_1 = 10,82 - \frac{1,342 (100 - V_g)}{V_g + V_b}$$

$$K_2 = 8,0 + 0,00568 V_g + 0,0002135 V_g^2$$

$$K_3 = 0,6 \log \frac{1,37 V_b^2 - 1}{1,33 V_b - 1}$$

$$K_4 = 0,7582 (K_1 - K_2)$$

V_g = volume de granulat (%)

V_b = volume de bitume (%)

Le modèle pour estimer la rigidité des enrobés le plus reconnu est certainement celui de l'Asphalt Institute. Ce modèle développé par différents groupes de recherche dirigés par Witczak a beaucoup évolué depuis la dernière édition de la méthode de formulation de l'Asphalt Institute [AI 1981]. Dans le cadre de cette étude, la version la plus récente de ce modèle développé en 1996 sera employée [Witczak & Fonseca 1996]. Cette version est présentée à l'équation 7.3. Bien que ce modèle ne soit pas encore reconnu, il est basé sur les mêmes données et la même approche que les modèles précédents, largement employés depuis plusieurs années.

$$\begin{aligned} \text{Log } E = & -0,261 + 0,008225 p_{200} - 0,00000101 p_{200}^2 \\ & + 0,00196 p_4 - 0,03157 V_a - 0,415 V_{be} / (V_{be} + V_a) \\ & + \frac{(1,87 + 0,002808 p_4 + 0,0000404 p_{38} - 0,0001786 p_{38}^2 + 0,0164 p_{34})}{1 + e^{(-0,716 \log f - 0,7425 \log \eta)}} \end{aligned} \quad (7.3)$$

E = module dynamique de l'enrobé (10^5 psi)

η = viscosité du bitume (10^6 poise)

f = fréquence de chargement (Hz)

V_a = volume des vides (%)

V_{be} = volume de bitume effectif (%)

p_{34} = masse totale cumulative de granulats retenue sur le tamis 3/4 po. (%)

p_{38} = masse totale cumulative de granulats retenue sur le tamis 3/8 po. (%)

p_4 = masse totale cumulative de granulats retenue sur le tamis no. 4 (%)

p_{200} = masse totale cumulative de granulats retenue sur le tamis no. 200 (%)

Les modèles sélectionnés pour l'étude comparative parmi les modèles développés dans le cadre de cette étude sont présentés au tableau 7.5. Les valeurs de rigidité réelles E ainsi que celle associées aux modèles développés dans le cadre de cette étude et aux modèles proposés par Witczak et par Shell sont présentées par les histogrammes des figures 7.3 et 7.4. Ces histogrammes présentent les différentes valeurs mesurées et estimées qui sont regroupées par types d'enrobés pour des températures de 5 et 15°C et une fréquence de 10 Hz. La nomenclature des modèles développés dans le cadre de cette étude est présentée au tableau 7.5.

Tableau 7.5 – Modèle de rigidité E (MPa) développés dans le cadre de cette étude en fonction de la température T (°C), de la fréquence fr (Hz) et de la rigidité E_b (kPa) et de l'angle de phase ϕ_b en cisaillement des bitumes pour les enrobés GB-20 et MB-16.

Nom aux Figures 7.3 et 7.4	Type d'enrobé	Modèle	R^2	σ	DL
Individuel	GB-20 conventionnel	$E = 10^{(3,97 - 0,031 T)} fr^{0,199}$	0,94	0,055	45
	GB-20 polymère	$E = 10^{(3,81 - 0,038 T)} fr^{0,269}$	0,96	0,056	45
	MB-16 80/100	$E = 10^{(4,12 - 0,023 T)} fr^{0,117}$	0,91	0,045	21
	MB-16 MG 90	$E = 10^{(4,04 - 0,027 T)} fr^{0,148}$	0,94	0,044	21
	MB-16 150/200	$E = 10^{(4,04 - 0,031 T)} fr^{0,179}$	0,93	0,054	21
	MB-16 MG 175	$E = 10^{(3,94 - 0,034 T)} fr^{0,201}$	0,94	0,056	21
Général	GB-20	$E = 10^{(0,016 T - 1,07)} fr^{0,234} E_b^{1,18} \phi_b^{0,018}$	0,96	0,055	91
	MB-16	$E = 10^{(1,87 - 0,003 T)} fr^{0,162} E_b^{0,578} \phi_b^{-0,185}$	0,92	0,058	91
Global	Global	$E = 10^{(1,42 - 0,0005 T)} fr^{0,198} E_b^{0,691} \phi_b^{-0,268}$	0,85	0,103	187

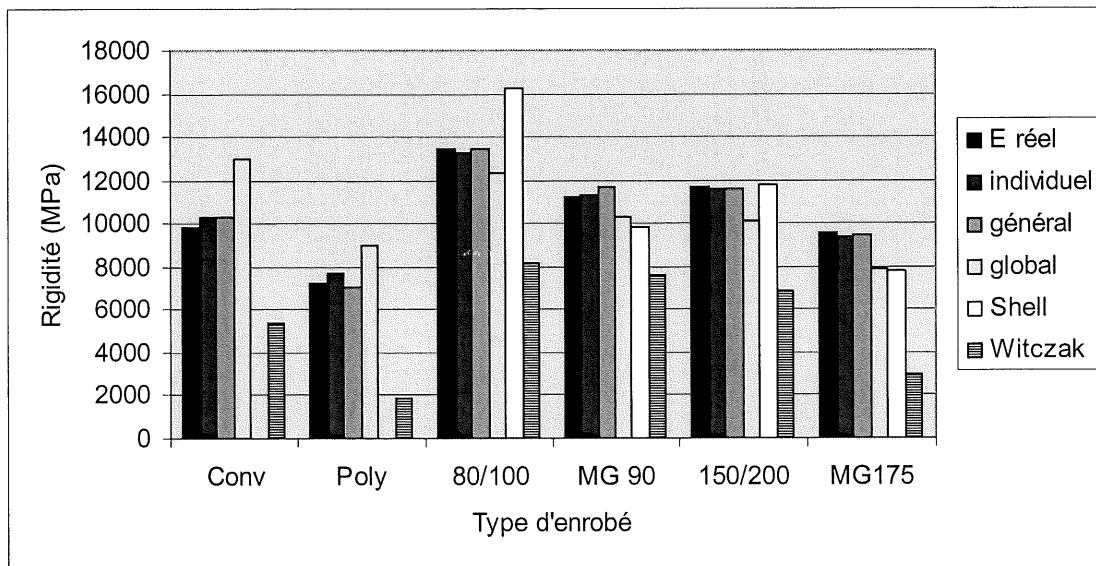


Figure 7.3 – Histogramme des valeurs de E mesurées et estimées à 5°C en fonction du type d'enrobé pour les enrobés GB-20 et MB-16.

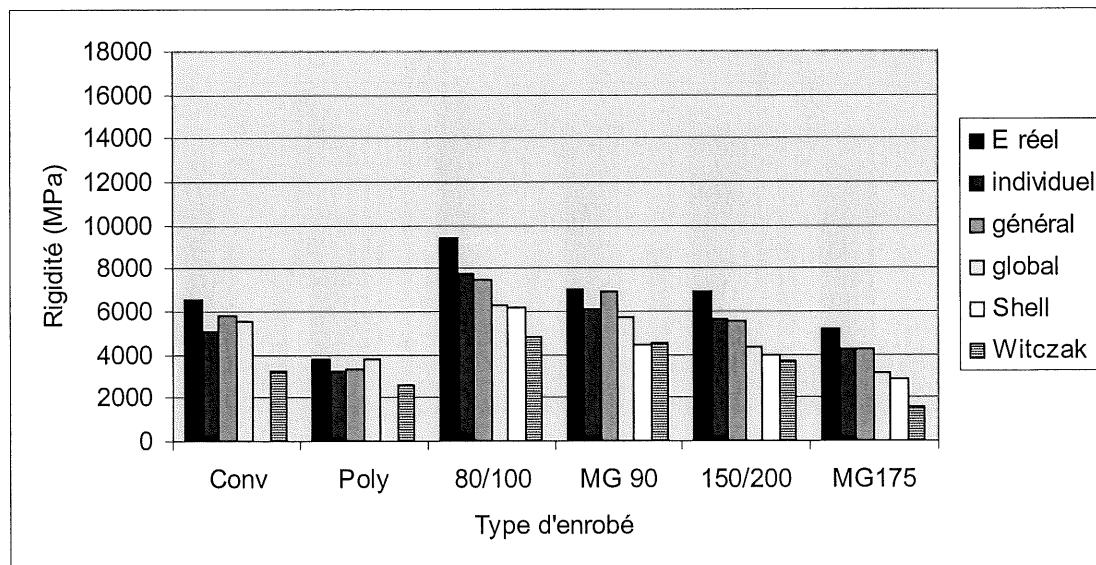


Figure 7.4 – Histogramme des valeurs de E mesurées et estimées à 15°C et 10 Hz en fonction du type d'enrobé pour les enrobés GB-20 et MB-16.

En premier lieu, on constate que les modèles individuels donnent une valeur de rigidité pratiquement identique à la valeur réelle E à 5°C alors qu'à 15°C on observe un léger écart. Cet écart est dû à l'allure des résultats obtenus sur les enrobés de base (section 5.3.2) et MB-16 (section 6.4.1) lors des essais de balayage de fréquence à 15°C et 30 Hz, ce qui vient fausser

quelque peu l'allure des modèles, donc la prédiction de la valeur de rigidité à 15°C. Les modèles généraux semblent donner pratiquement la même estimation de la valeur de la rigidité que les modèles individuels quelle que soit la température étudiée, ce qui semble indiquer que la rigidité et l'angle de phase du bitume mesurés au DSR décrivent correctement l'influence du bitume sur la rigidité de l'enrobé.

En ce qui concerne le modèle global, bien que sa valeur de rigidité prédite soit la majorité du temps acceptable, il a de la difficulté à classer les enrobés dans le même ordre que les valeurs de rigidité réelles E , ce qui est inacceptable pour la sélection des enrobés. Cet écart se fait surtout remarquer lorsque l'on compare la rigidité des enrobés GB-20 et MB-16. À ce sujet, le modèle de Witczak semble bien se tirer d'affaire, bien qu'il n'estime pas correctement les valeurs de rigidité, le classement semble adéquat ce qui est un avantage pour la sélection des enrobés à mettre en place. Par ailleurs, ce modèle donne toujours une valeur de rigidité plus faible, variant du tiers au deux tiers de la valeur réelle E . En ce qui concerne le modèle de Shell les valeurs estimées et le classement des enrobés semblent acceptables mais l'on ne dispose pas de cette information pour les enrobés GB-20 ce qui limite le jugement que l'on peut porter à son égard.

Ainsi, il semble que l'utilisation du modèle de Witczak semble envisageable pour une analyse préliminaire en doublant toutefois la valeur déterminée par le modèle. Pour simplement estimer la valeur réelle de rigidité, on peut employer les modèles généraux ou encore globaux tout dépendant du niveau de précision que l'on désire, ce qui ne permet pas d'estimer la rigidité d'enrobés de volumétries différentes de celles étudiées. Par ailleurs, il est possible d'employer le modèle proposé par Shell si l'on dispose des informations qu'il requiert et qui ne sont généralement plus caractérisées de nos jours.

7.2.2 Résistance à la fatigue

Il existe un besoin pour des modèles capables de prédire la résistance à la fatigue des enrobés sans avoir recours à la caractérisation en laboratoire qui nécessite des ressources importantes. Ainsi, l'on retrouve dans la littérature plusieurs modèles de résistance à la fatigue des enrobés.

Une grande partie de ces modèles se basent uniquement sur la valeur de la déformation en tension pour déterminer le nombre de cycles à la rupture d'un enrobé. Ainsi, ils sont inutilisables hors du contexte pour lequel ils ont été développés puisqu'ils ne peuvent évaluer l'influence de la formulation de l'enrobé sur sa résistance à la fatigue. Les modèles de la littérature visés par cette étude comparative sont plutôt des modèles de types généraux, tel que présenté à la section 2.10.2. Dans un premier temps, ces modèles sont évalués individuellement de même que les modèles développés dans le cadre de ce projet et sélectionnés pour l'étude comparative. Par la suite, tous ces modèles sont comparés entre eux de manière à établir quels modèles semblent intéressants pour la sélection d'un enrobé en fonction de sa résistance à la fatigue.

7.2.2.1 Modèles de la littérature

L'analyse d'un modèle général pour la détermination de la résistance à la fatigue d'un enrobé est complexe. Ainsi, il est proposé d'évaluer chacun des modèles généraux présentés lors de la revue de littérature à la section 2.10.2 de manière individuelle. Le seul modèle général de la section 2.10.2 qui ne sera pas évalué est le modèle proposé par l'Université de Nottingham puisqu'il ne s'applique pas à l'analyse d'essais à déformation contrôlée. L'analyse proposée cherche à évaluer le potentiel des modèles de la littérature pour le classement des enrobés en fonction des connaissances acquises sur les enrobés de base et MB-16.

Shell

Le Centre de Recherche Shell à Grand-Couronne en France a présenté en 1980 une méthode pour prédire la résistance à la fatigue des enrobés [Bonnaure & al 1980]. L'équation 7.4 présente le modèle proposé pour analyser les enrobés dans le cadre d'essais à déformation constante. La valeur de rigidité E exigée par ce modèle est déterminée à partir des « nomographes » que l'on retrouve aux figures 7.1 et 7.2 basés sur les propriétés du bitume et de la volumétrie de l'enrobé. Dans le cadre de cette étude, la valeur de rigidité dynamique E obtenue lors des essais de flexion par balayage de fréquence est également employée pour déterminer le nombre de cycles à la rupture de l'enrobé. L'indice de pénétration PI « Penetration Index » exigé par le modèle est inconnu pour les bitumes employés pour la formulation des enrobés ESG-14 et GB-20. Ces

bitumes ont été caractérisés selon la norme 4101 qui n'exige pas l'analyse de ce paramètre. Ainsi, uniquement les relations de fatigue pour les enrobés MB-16 sont présentées. La figure 7.5 présente les droites de fatigue à 5 et 15°C de l'enrobé MB-16 lorsque sa rigidité est déterminée selon l'approche proposée par Shell [Bonnaure & al 1977]. La figure 7.6 présente les relations de fatigue déterminées à partir des valeurs de rigidités obtenues des essais de balayage de fréquence.

$$\varepsilon = [4,102 \text{ PI} - 0,205 \text{ PI } V_b + 1,094 V_b - 2,707] E^{-0,36} N^{-0,2} \quad (7.4)$$

ε = déformation initiale ou déformation constante

N = nombre de cycles à la rupture

PI = indice de pénétration du bitume

V_b = teneur volumétrique en bitume (%)

E = rigidité de l'enrobé (N/m^2)

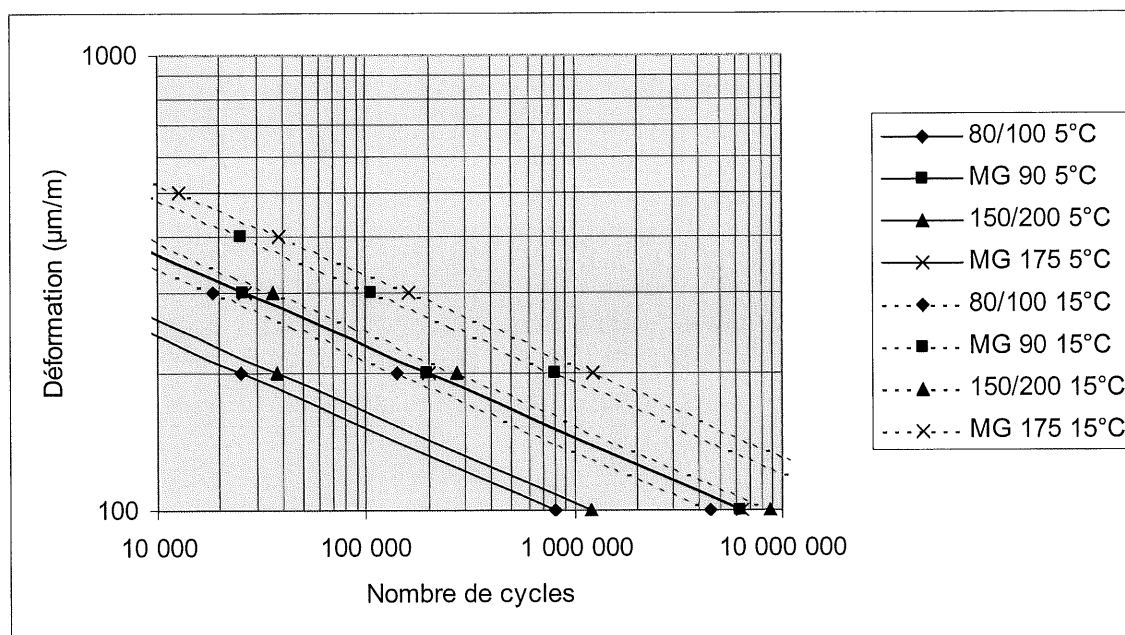


Figure 7.5 – Droites de fatigue selon le modèle Shell à 5 et 15°C avec la valeur de rigidité déterminée selon l'approche proposée par Shell pour les enrobés MB-16.

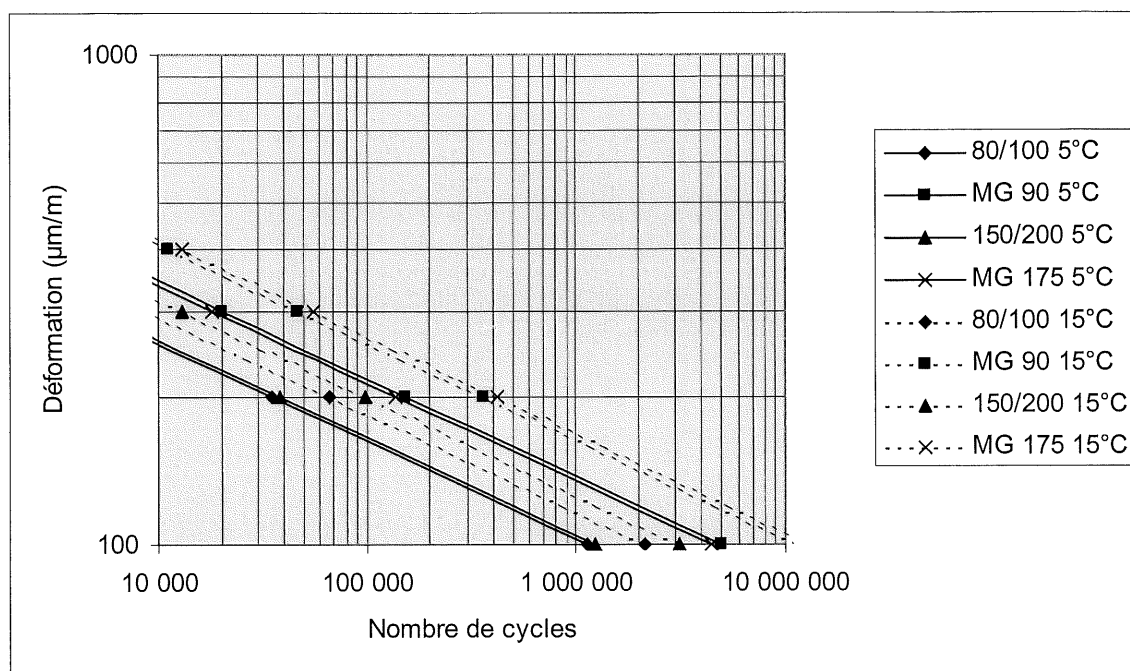


Figure 7.6 – Droites de fatigue selon le modèle Shell à 5 et 15°C avec la valeur de rigidité dynamique en flexion pour les enrobés MB-16.

Les droites de fatigue des figures 7.5 et 7.6 ont une pente constante ce qui permet de classer simplement les enrobés. Un paramètre de classement tel que la déformation admissible suite à un million de cycles ϵ_6 peut s'avérer intéressant dans ce cas. On retrouve au tableau 7.6 les valeurs de ϵ_6 associées aux droites de fatigue pour des valeurs de rigidité dynamique E mesurées en laboratoire et des valeurs de rigidité déterminées à partir des nomogrammes proposés par Shell.

Tableau 7.6 – Valeurs de déformation ϵ_6 (μm/m) à 5 et 15°C selon le modèle de Shell avec la rigidité dynamique en flexion et la rigidité selon l'approche Shell pour les enrobés MB-16.

Type d'enrobé	Rigidité dynamique E		Rigidité méthode Shell	
	5°C	15°C	5°C	15°C
MB-16 80/100	103	116	96	135
MB-16 MG 90	137	163	144	192
MB-16 150/200	104	126	104	154
MB-16 MG 175	134	168	145	209

On constate que l'approche proposée par Shell donne un classement des enrobés similaire à celui observé en laboratoire, peu importe la méthode pour déterminer la rigidité de l'enrobé. Les enrobés formulés avec les bitumes intermédiaires MG 90 et MG 175 résistent mieux à la fatigue que leur homologues. Ce classement ne correspond qu'en partie à la caractérisation de l'évolution de la fissuration sur l'autoroute 10. De plus, on observe un gain de la résistance à la fatigue entre 5 et 15°C, ce qui n'a pas été observé lors de la caractérisation en laboratoire. Par ailleurs, il est difficile d'écarter ce modèle de l'étude comparative puisque qu'il reproduit le classement des enrobés tel qu'observé en laboratoire. Avant de rejeter ce modèle, il faudrait s'assurer que le classement des enrobés sur l'autoroute 10 est reproductible sur d'autres sites expérimentaux et que le gain de résistance à basse température soit plus documenté.

En ce qui concerne la valeur de rigidité employée, elle ne semble pas influencer la position des droites de fatigue à 5°C alors qu'on observe un écart à 15°C où l'emploi de la valeur de rigidité dynamique E déterminée en laboratoire donne une valeur de résistance à la fatigue plus faible. Cet état ne semble pas constituer un problème puisque la position de droites de fatigue est relative si l'on considère que l'on doit multiplier le nombre de cycles obtenu par un facteur de correction pour tenir compte de l'écart entre le laboratoire et la route.

Asphalt Institute

Parmi les modèles généraux les plus employés, on retrouve également le modèle de l'Asphalt Institute présenté dans la neuvième édition du guide de conception « Asphalt Institute Design Manual (MS-1) » publiée en 1982 [The Asphalt Institute 1982]. Ce modèle présenté par l'équation 7.5 estime le nombre de cycles de chargement nécessaire pour atteindre une fissuration par fatigue de 20% sur la surface totale d'enrobé. La valeur de rigidité E exigée par ce modèle est déterminée selon l'approche proposée par Shell avec le « nomographe » que l'on retrouve aux figures 7.1 et 7.2. Comme pour l'analyse du modèle Shell, la valeur de rigidité dynamique E obtenue lors des essais de flexion par balayage de fréquence est également employée pour déterminer le nombre de cycles à la rupture de l'enrobé. Ainsi, on retrouve à la figure 7.7 les droites de fatigue des enrobés MB-16 avec leur rigidité déterminée selon l'approche proposée par Shell. Les droites de fatigue pour les enrobés GB-20 ne sont pas

présentées puisque l'on ne dispose pas des informations nécessaires sur le bitume pour déterminer la rigidité de l'enrobé selon la méthode proposée par Shell. Par ailleurs, on retrouve aux figures 7.8 et 7.9, pour des températures respectives de 5 et 15°C, les droites de fatigues pour les enrobés GB-20 et MB-16 correspondant aux valeurs de rigidité caractérisées par balayage de fréquence.

$$N = 0,00432 C \varepsilon^{-3,291} E^{-0,854} \quad (7.5)$$

ε = déformation en tension à la base du revêtement (microdéformation)

N = nombre de cycles (millions)

E = rigidité de l'enrobé (MPa) [figure 7.2]

$C = 10^M$ où $M = 4,84 [V_b / (V_a + V_b) - 0,69]$

V_b = teneur volumique en bitume (%)

V_a = teneur volumique en vides (%)

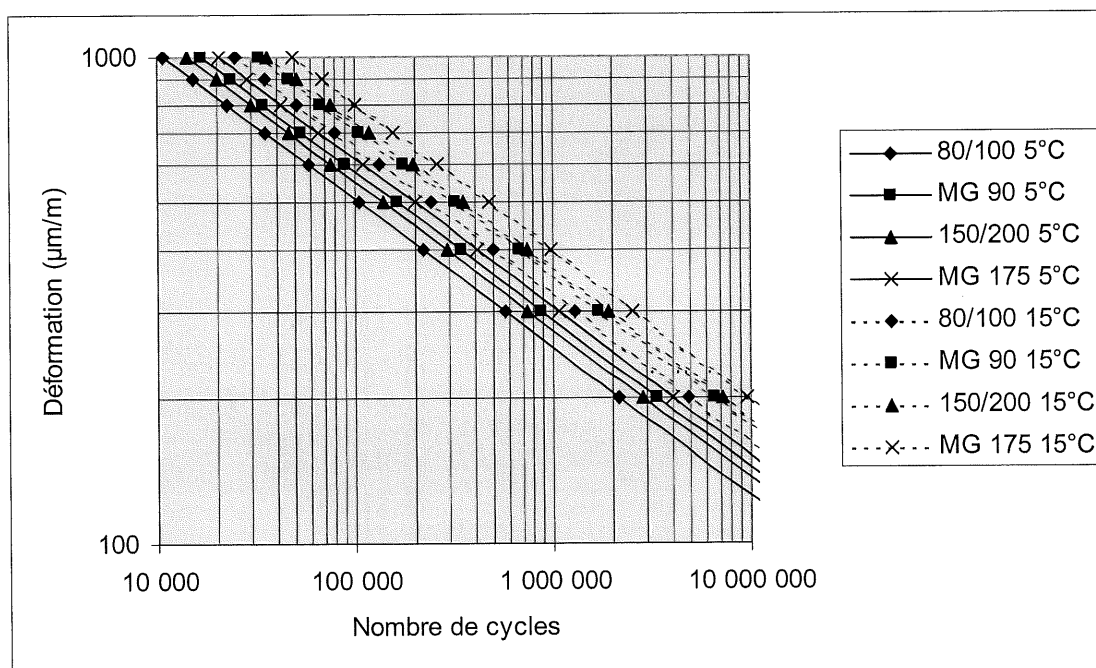


Figure 7.7 – Droites de fatigue selon le modèle de l'Asphalt Institute à 5 et 15°C avec la valeur de rigidité déterminée selon l'approche proposée par Shell pour les enrobés MB-16.

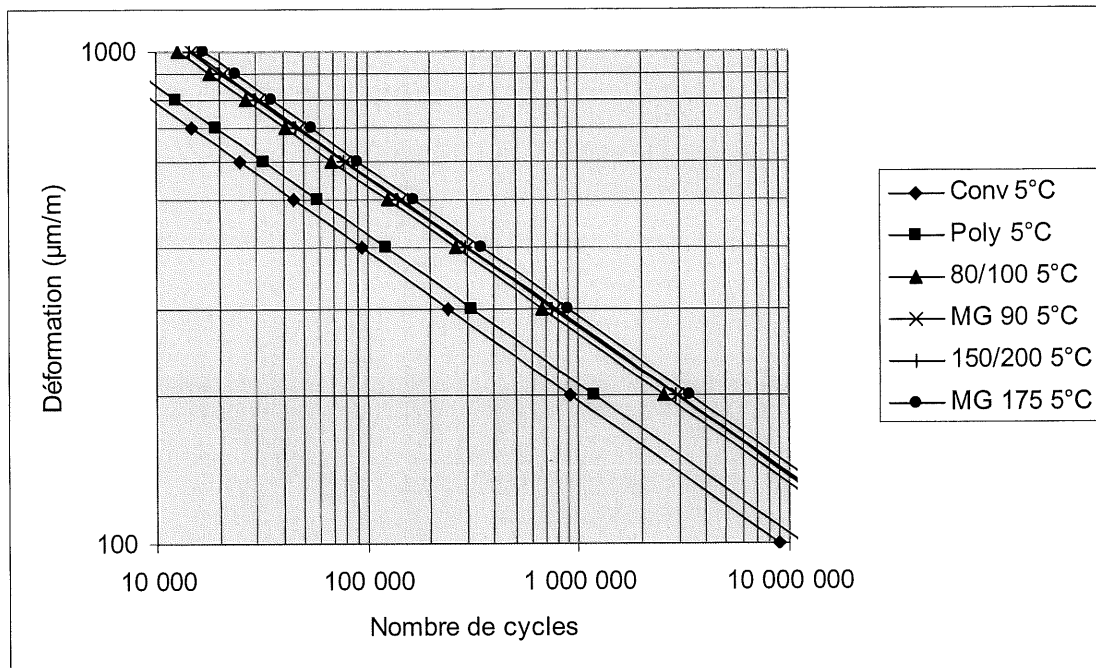


Figure 7.8 – Droites de fatigue selon le modèle de l'Asphalt Institute à 5°C avec la valeur de rigidité dynamique en flexion pour les enrobés GB-20 et MB-16.

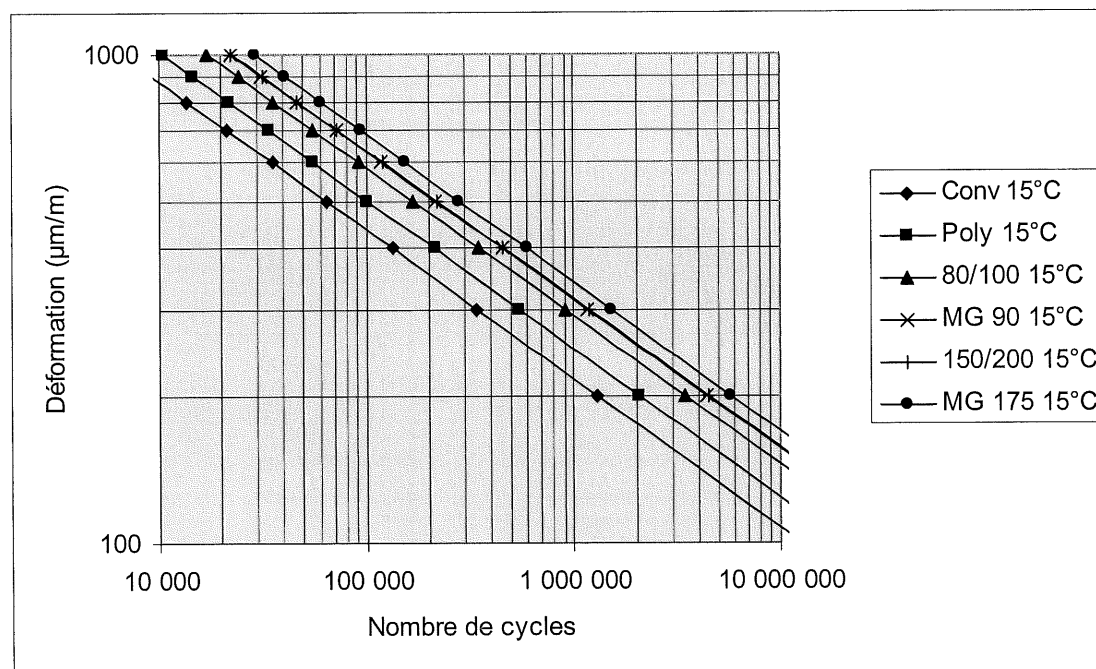


Figure 7.9 – Droites de fatigue selon le modèle de l'Asphalt Institute à 15°C avec la valeur de rigidité dynamique en flexion pour les enrobés GB-20 et MB-16.

La pente des droites de fatigue proposées par l'Asphalt Institute est également constante, ce qui permet d'envisager ε_6 comme paramètre de classement des enrobés. On retrouve au tableau 7.8 les valeurs de ε_6 des droites de fatigues déterminées selon le modèle de l'Asphalt Institute, soit avec la valeur de rigidité dynamique E déterminée en laboratoire ou déterminée à partir des nomographes de Shell.

Tableau 7.7 – Valeurs de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$) à 5 et 15°C selon le modèle de l'Asphalt Institute avec la rigidité dynamique en flexion et la rigidité selon l'approche Shell pour les enrobés GB-20 et MB-16.

Type d'enrobé	Rigidité dynamique E		Rigidité nomographes Shell	
	5°C	15°C	5°C	15°C
GB-20 conv	195	217	---	---
GB-20 poly	211	250	---	---
MB-16 80/100	266	291	253	324
MB-16 MG 90	278	314	288	354
MB-16 150/200	275	315	274	365
MB-16 MG 175	290	341	306	398

Les deux approches pour déterminer la rigidité de l'enrobé donnent le même classement pour les enrobés MB-16. En ce qui concerne les enrobés GB-20, on ne peut pas comparer puisque l'on ne dispose pas des informations nécessaires sur le bitume pour employer les nomographes de Shell. Le classement des enrobés selon l'Asphalt Institute est intéressant puisqu'il respecte à la fois le classement des enrobés MB-16 en laboratoire et sur la route. En effet, l'enrobé MB-16 MG 175 est classé le plus résistant et l'enrobé MB-16 80/100 le moins résistant alors que les deux autres enrobés ne peuvent être discriminés. Ce classement semble refléter la dualité entre la caractérisation en laboratoire et la situation sur le site concernant les enrobés MB-16 MG 90 et 150/200. Par ailleurs, on constate que l'enrobé MB-16 est plus résistant à la fatigue que l'enrobé GB-20, ce qui est certainement attribuable à sa plus grande quantité de bitume. Par contre, les observations en laboratoire indiquent que l'enrobé GB-20 polymère présente la meilleure résistance à la fatigue. Ainsi, le modèle de l'Asphalt Institute semble pertinent pour le classement des enrobés mais avec certaines limitations qui ne peuvent être vérifiées puisque le comportement de l'enrobé GB-20 n'a pas été vérifié sur la route.

Myre

Myre a développé en 1992 un modèle pour les enrobés employés en Norvège à partir d'un essai de flexion avec chargement unique au centre de la poutre [Myre 1992]. Ce modèle présenté par l'équation 7.6 inclut la notion de « mode factor » MF dans son expression tel que décrit par l'équation 2.20. Le MF est égal à 1 dans le cadre de cette étude puisque la caractérisation a été effectuée à déformation constante. La rigidité dynamique en flexion mesurée par l'essai de chargement aux tiers points est employée pour l'analyse de ce modèle. Les droites de fatigue déterminées à partir du modèle de Myre sont présentées pour les enrobés GB-20 et MB-16 à la figure 7.10 pour une température de 5°C et à la figure 7.11 pour une température de 15°C.

$$\begin{aligned} \text{Log } N = & 34,5326 - 6,1447 \log \varepsilon - 3,3950 \log E \\ & + 0,3864 (\log V_b) \text{ MF} - 0,0788 V_a \end{aligned} \quad (7.6)$$

ε = déformation

N = nombre de cycles à la rupture

E = rigidité de l'enrobé (MPa)

V_b = teneur volumique en bitume (%)

V_a = teneur volumique en vides (%)

MF = 1 pour déformation constante ou -1 pour contrainte constante

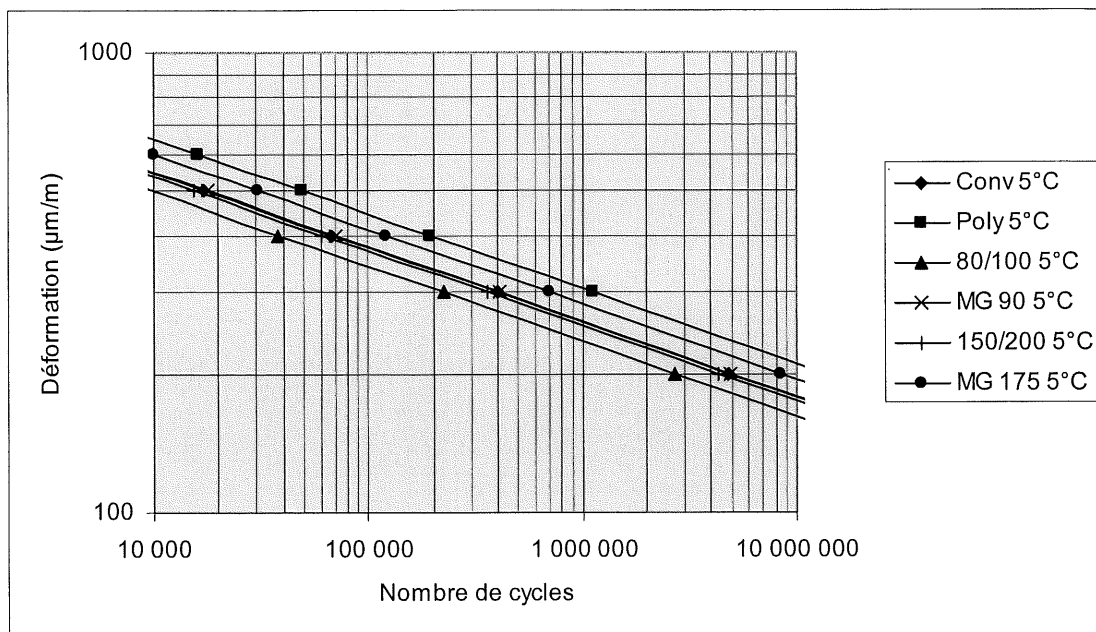


Figure 7.10 – Droites de fatigue selon le modèle de Myre à 5°C avec la valeur de rigidité dynamique en flexion pour les enrobés GB-20 et MB-16.

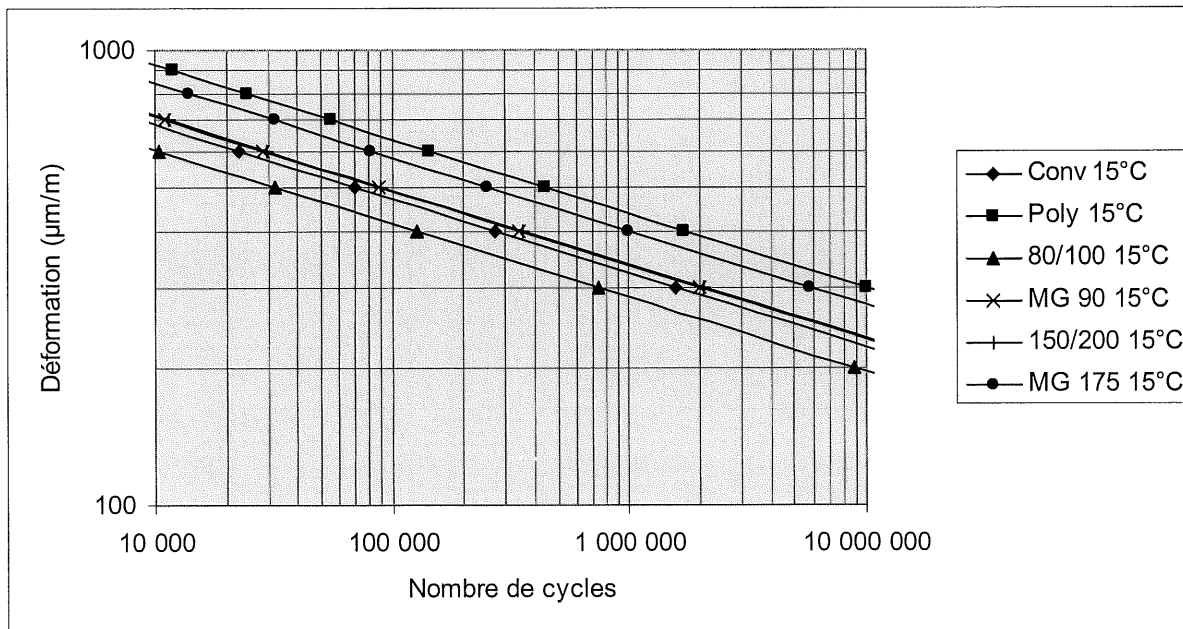


Figure 7.11 – Droites de fatigue selon le modèle de Myre à 15°C avec la valeur de rigidité dynamique en flexion pour les enrobés GB-20 et MB-16.

La pente des différents modèles est constante ce qui permet d'envisager l'utilisation d'un paramètre tel ε_6 pour le classement des enrobés. Ainsi, on retrouve au tableau 7.9 les valeurs de ε_6 tirées des équations de fatigue déterminées selon le modèle de Myre.

Tableau 7.8 – Valeurs de déformation ε_6 ($\mu\text{m/m}$) à 5 et 15°C selon le modèle de Myre avec la rigidité dynamique en flexion pour les enrobés GB-20 et MB-16.

Type d'enrobé	5°C	15°C
GB-20 conventionnel	258	324
GB-20 polymère	306	437
MB-16 80/100	235	285
MB-16 MG 90	259	336
MB-16 150/200	254	338
MB-16 MG 175	283	399

Le modèle de Myre indique que l'enrobé GB-20 polymère présente la plus grande résistance à la fatigue conformément aux résultats de laboratoire. Le classement des enrobés MB-16 est similaire à celui proposé par le modèle de l'Asphalt Institute. Ainsi, ce modèle évite également la dualité entre les résultats de laboratoire et sur la route. Par ailleurs, la résistance à la fatigue de l'enrobé GB-20 conventionnel semble surestimée puisqu'elle est supérieure à celle de l'enrobé MB-16 80/100 dont le type de bitume est comparable mais la teneur en bitume est plus élevée. Bien entendu, il ne s'agit que d'une hypothèse qui n'a pas été vérifiée dans le cadre de ce projet. Malgré cette situation, ce modèle semble intéressant pour le classement des enrobés.

SHRP

En dernière analyse, le programme de recherche américain SHRP a également développé en 1994 son modèle pour prédire la résistance à la fatigue des enrobés basé sur des essais de flexion de poutre aux tiers points [Tayebali & al 1994]. L'équation 7.7 présente ce modèle où la rigidité de l'enrobé est remplacée par son module de perte E'' tel que décrit à la section 2.6.1. Le module de perte $E'' = E \sin \phi$ permet de tenir compte à la fois de l'effet de la rigidité et de l'angle de phase. Les valeurs de rigidité et d'angle de phase dynamique mesurées par l'essai de flexion aux tiers points sont employées pour cette analyse. Les figure 7.12 et 7.13 présentent les droites de fatigue des enrobés GB-20 et MB-16 pour des températures de 5 et 15°C. Les modèles présentent

une pente constante ce qui permet d'envisager le paramètre ε_6 pour le classement des enrobés au tableau 7.10.

$$N = 2,738 \times 10^5 e^{0,077 \text{ VFB}} \varepsilon^{-3,624} E''^{-2,720} \quad (7.7)$$

ε = déformation initiale

N = nombre de cycles à la rupture

E'' = rigidité de perte initiale (psi) $[E \sin \phi]$

VFB = vides comblés par le bitume (%)

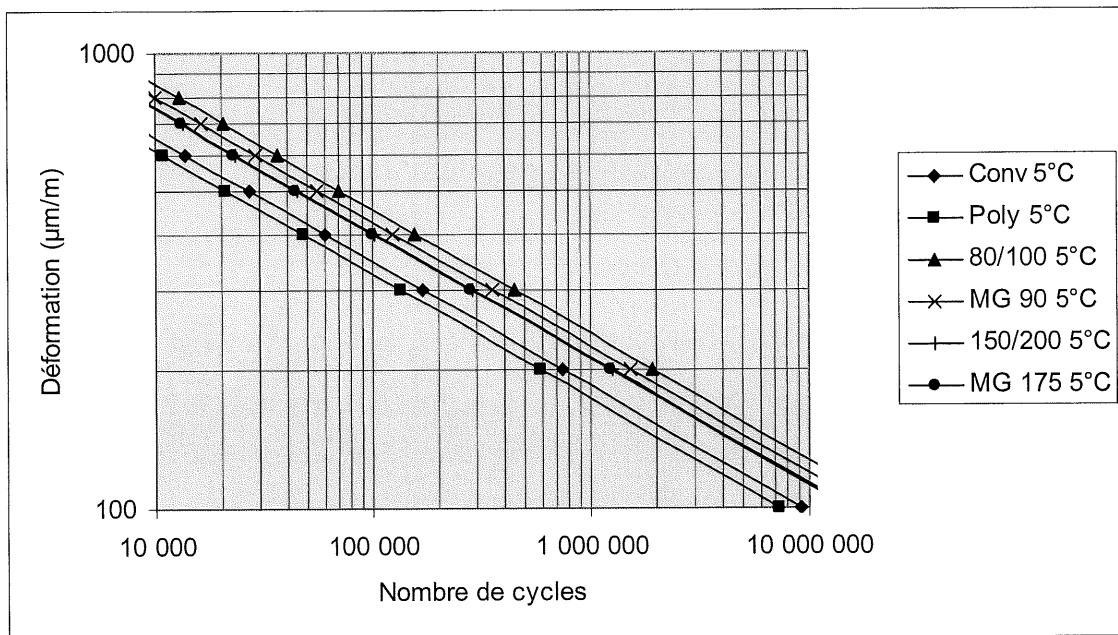


Figure 7.12 – Droites de fatigue selon le modèle de SHRP à 5°C avec la valeur de rigidité dynamique en flexion pour les enrobés GB-20 et MB-16.

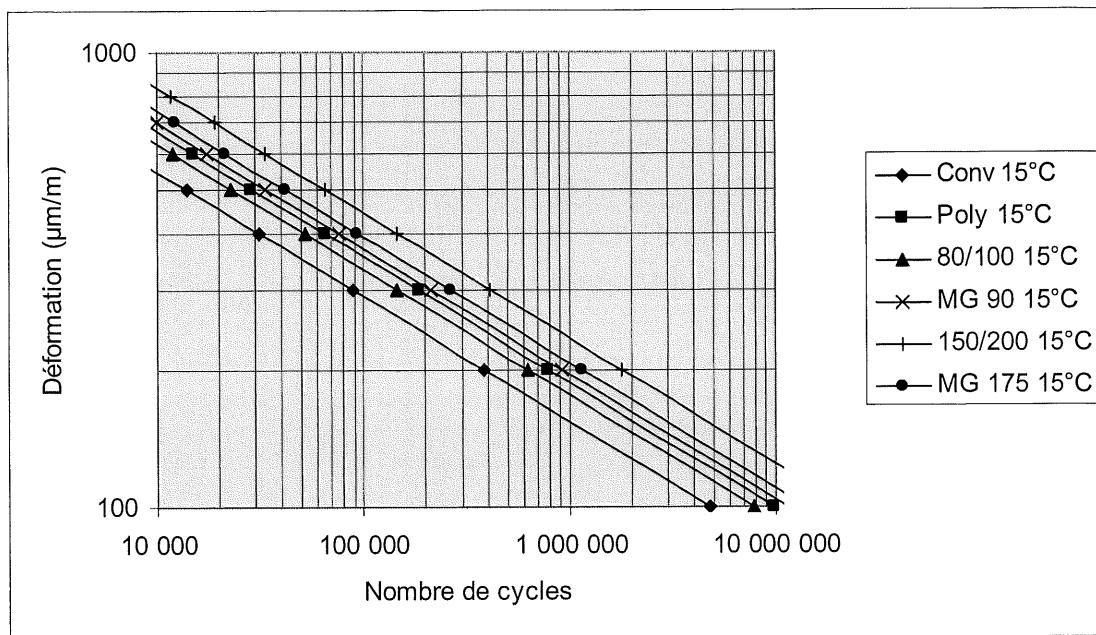


Figure 7.13 – Droites de fatigue selon le modèle de SHRP à 15°C avec la valeur de rigidité dynamique en flexion pour les enrobés GB-20 et MB-16.

Tableau 7.9 – Valeurs de déformation ε_6 (μm/m) à 5 et 15°C selon le modèle de SHRP avec la rigidité dynamique en flexion pour les enrobés GB-20 et MB-16.

Type d'enrobé	5°C	15°C
GB-20 conventionnel	184	154
GB-20 polymère	172	188
MB-16 80/100	240	177
MB-16 MG 90	225	196
MB-16 150/200	213	176
MB-16 MG 175	211	207

Étrangement, on observe que le classement des enrobés proposé par le SHRP est différent en fonction de la température. En effet, le modèle du SHRP indique à 5°C que dans le cas de l'enrobé GB-20 le bitume conventionnel est plus résistant à la fatigue et que dans le cas de l'enrobé MB-16 le bitume 80/100 est plus résistant. À 15°C, les bitumes MG 90 et MG 175 sont les plus résistants pour l'enrobé MB-16 et le bitume polymère est plus résistant pour l'enrobé GB-20. Bien que le classement à 15°C semble refléter les observations en laboratoire, l'écart entre les résistances déterminées pour chacune des températures rend ce modèle difficile à employer. Ainsi, bien qu'il soit possible que ce modèle soit correct, on ne peut le recommander pour la sélection des enrobés puisqu'il semble contredire certains constats du projet.

7.2.2.2 Modèles développés dans le cadre de ce projet

Les modèles développés dans le cadre de ce projet sont comparés entre eux dans cette section.

L'objectif est de déterminer quels modèles sont pertinents pour effectuer la comparaison avec les modèles de la littérature analysés à la section précédente. On retrouve au tableau 7.10 trois formes de modèles développés dans le cadre de ce projet, soit des modèles individuels, généraux et globaux. Ces modèles sont basés sur la définition de la rupture conventionnelle $N_{1/2}$. Pour les fins de l'étude comparative, il semble suffisant d'employer uniquement une définition de la rupture afin d'alléger les explications, puisque les deux définitions de la rupture donnent des modèles similaires. Les modèles $N_{1/2}$ ont été préférés puisqu'il s'agit de la définition employée pour le développement des modèles de la littérature. Les recommandations de cette étude s'appliquent sans contredit aux modèles N_r . On retrouve également au tableau 7.10 les valeurs du coefficient de détermination R^2 , de l'écart type σ et du nombre de degré de liberté DL.

Tableau 7.10 – Modèles de fatigue généraux et globaux en fonction de la déformation ε ($\mu\text{m/m}$), de la température T ($^{\circ}\text{C}$), de la rigidité E (MPa) et de l'angle de phase ϕ ($^{\circ}$) pour les enrobés GB-20 et MB-16.

Type de modèle	Type d'enrobé	Modèle	R^2	σ	DL
Individuel	GB-20 conv	$N = 10^{(16,6 - 0,096 T + 0,005 T^2)} \varepsilon^{-4,45}$	0,93	0,146	19
	GB-20 poly	$N = 10^{(17,7 + 0,098 T)} \varepsilon^{-4,94}$	0,89	0,194	21
	MB-16 5°C	$N = 1,18 \cdot 10^{99} \varepsilon^{-5,27} E^{-17,1} \phi^{-10,1}$	0,89	0,190	17
	MB-16 15°C	$N = 3,32 \cdot 10^{48} \varepsilon^{-4,15} E^{-6,36} \phi^{-5,90}$	0,87	0,186	17
Général	GB-20	$N = 10^{(37,2 - 0,088 T - 0,001 T^2)} \varepsilon^{-4,60} E^{-5,39} \phi^{1,16}$	0,90	0,182	41
	MB-16	$N = 10^{(41,6 - 0,004 T)} \varepsilon^{-4,35} E^{-5,29} \phi^{-3,44}$	0,82	0,222	37
Global	Global	$N = 10^{(24,5 - 0,055 T + 0,001 T^2)} \varepsilon^{-3,20} E^{-2,54} \phi^{-0,60}$	0,61	0,332	83

Dans un premier temps, on propose l'analyse des différents modèles de manière séparée afin d'évaluer leur potentiel à classer les différents types d'enrobés. Les modèles individuels sont présentés aux figures 7.14 à 7.15 où l'on retrouve les droites de fatigue pour les enrobés GB-20 et MB-16 pour des températures respectives de 5 et 15°C.

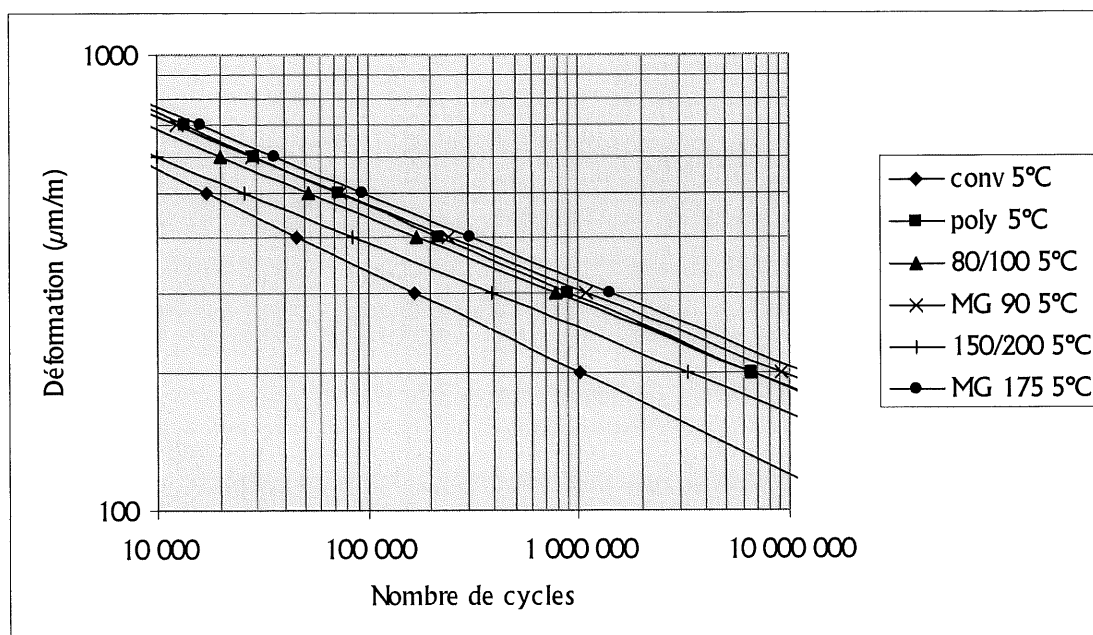


Figure 7.14 – Droites de fatigue individuelles à 5°C pour les enrobés GB-20 et MB-16.

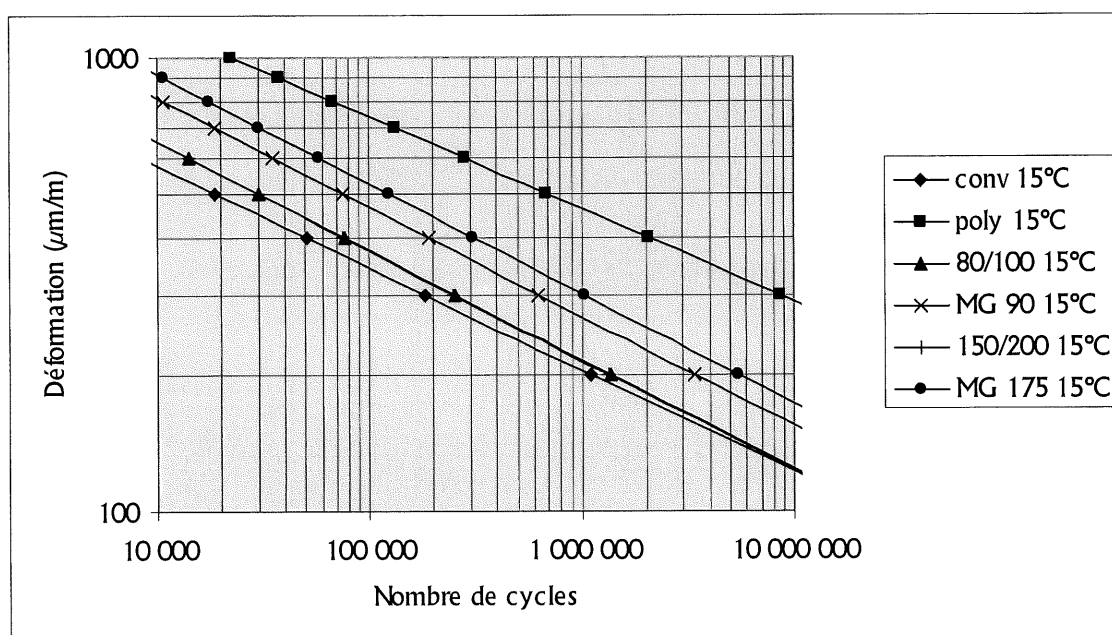


Figure 7.15 – Droites de fatigue individuelles à 15°C pour les enrobés GB-20 et MB-16.

Les droites de fatigues individuelles semblent présenter des pentes relativement égales ce qui limite les croisements entre les droites et simplifie l'analyse. En ce qui concerne l'enrobé GB-20, les modèles indiquent clairement que le bitume polymère présente une performance

largement supérieure en fatigue au bitume conventionnel. De même, pour l'enrobé MB-16, on retrouve le classement des bitumes tel qu'identifié au chapitre 6, bien que l'écart entre les bitumes conventionnels et les bitumes modifiés ne soit pas aussi marqué à 5°C. Ainsi, les modèles individuels semblent envisageables pour la conception mais ne sont certainement pas suffisamment généraux pour être recommandés. On retrouve aux figures 7.16 et 7.17 les modèles généraux en fonction du type d'enrobé, soit GB-20 et MB-16, pour des températures respectives de 5 et 15°C.

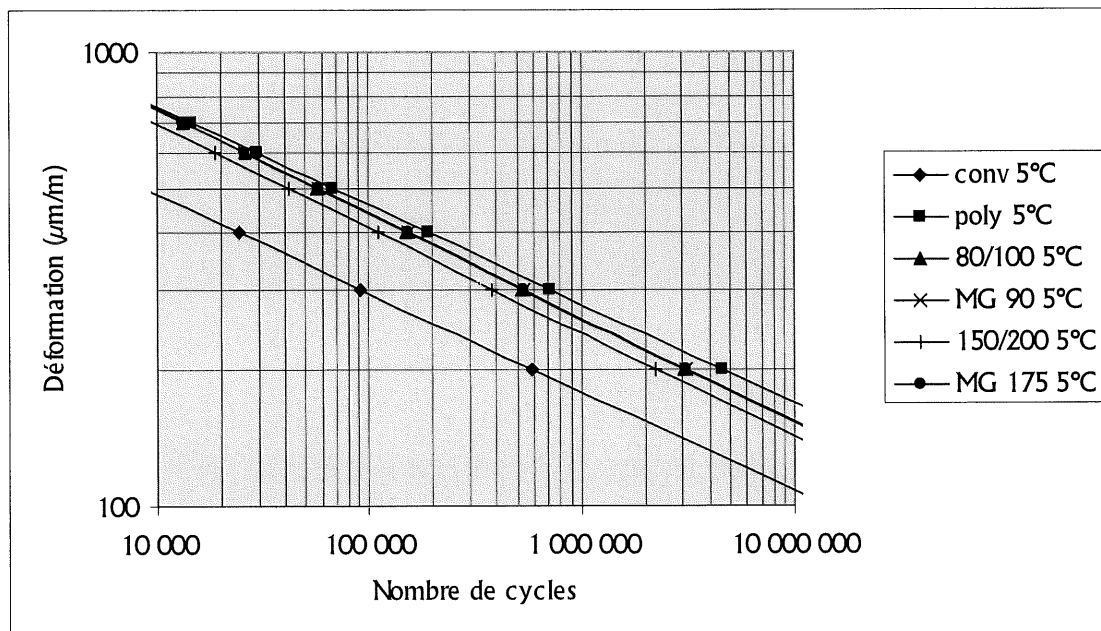


Figure 7.16 – Droites de fatigue générales à 5°C pour les enrobés GB-20 et MB-16.

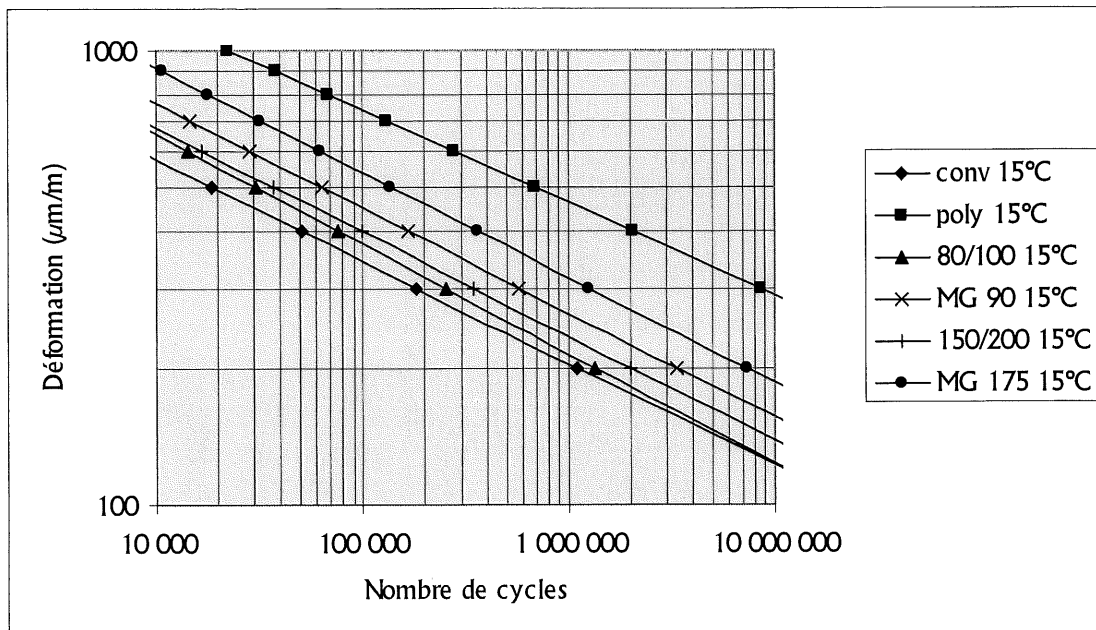


Figure 7.17 – Droites de fatigue générales à 15°C pour les enrobés GB-20 et MB-16.

Les droites de fatigue générales ont pratiquement la même valeur de pente pour les deux types d'enrobés, soit $-4,6$ pour l'enrobé GB-20 et $-4,4$ pour l'enrobé MB-16. Ainsi, ces modèles se comparent aisément entre eux. Comme dans le cas des modèles individuels, on constate un écart important entre les deux types d'enrobés GB-20. De même, les modèles généraux semblent également capables de différencier les différents enrobés MB-16 à 15°C. L'écart observé est comparable aux constatations du chapitre 6. Par ailleurs, la discrimination entre ces enrobés est pratiquement inexistante à 5°C. Ainsi, il semble que les modèles généraux soient envisageables pour la conception mais qu'une température de 15°C soit plus indiquée que 5°C. Par ailleurs, on peut être tenté de représenter le comportement de différents types d'enrobés par un modèle unique. On retrouve aux figures 7.18 et 7.19 la représentation du modèle global pour des températures respectives de 5 et 15°C.

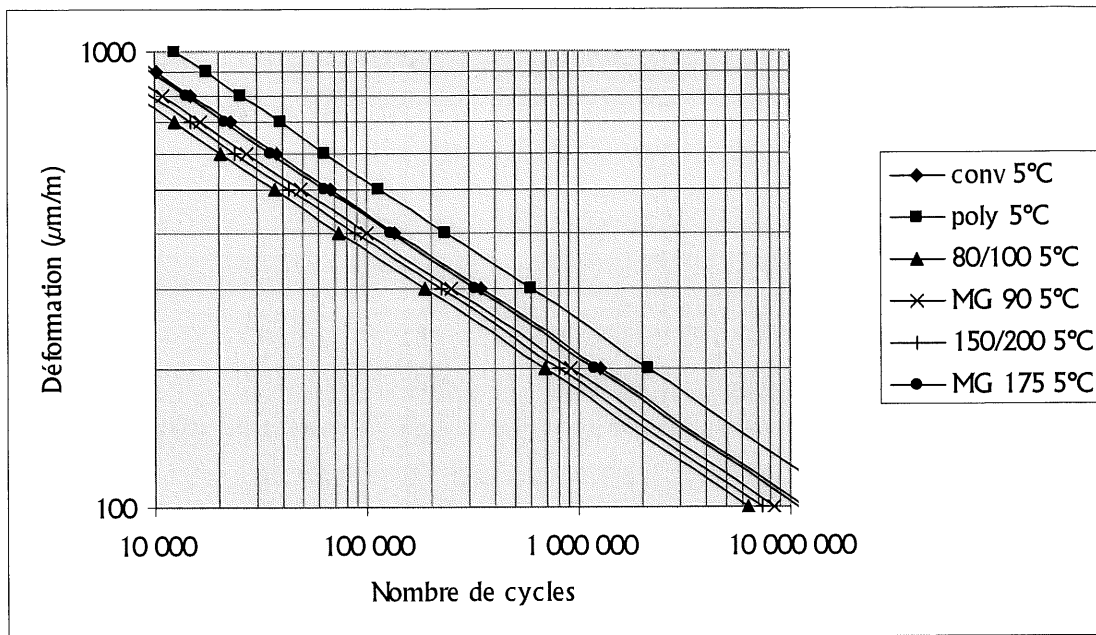


Figure 7.18 – Droites de fatigue globales à 5°C pour les enrobés GB-20 et MB-16.

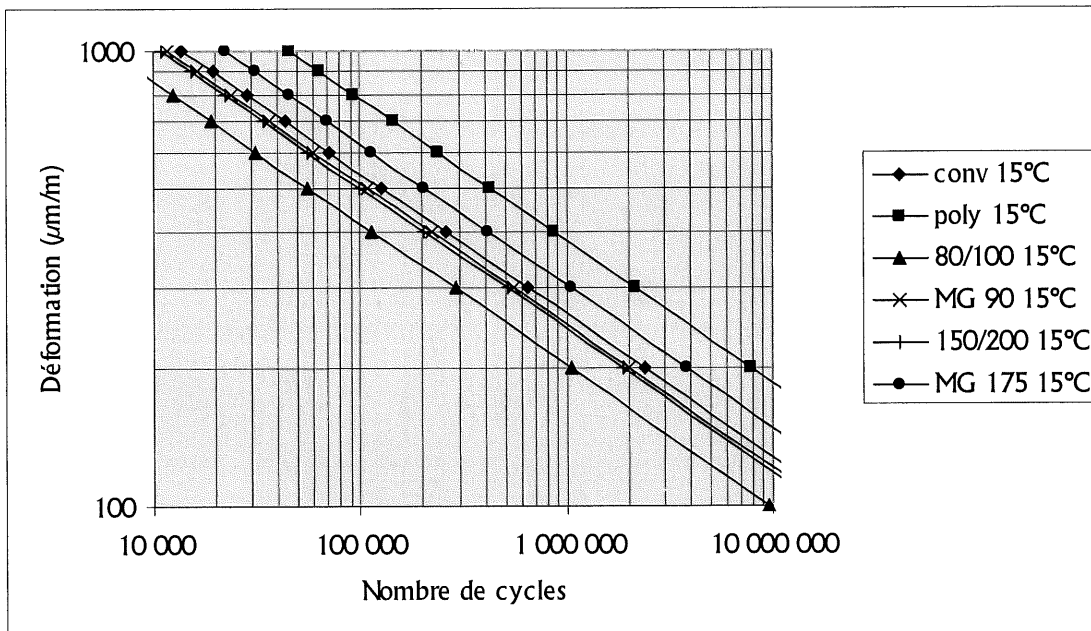


Figure 7.19 – Droites de fatigue globales à 15°C pour les enrobés GB-20 et MB-16.

En ce qui concerne le modèle global, il semble surestimer la résistance à la fatigue de l'enrobé GB-20 formulé avec le bitume conventionnel. En effet, cet enrobé classé comme le moins performant par les autres modèles, se retrouve au milieu des enrobés MB-16 aux figures 7.18

et 7.19. Il est peu probable qu'il en soit ainsi puisque sa teneur en bitume est plus faible que celle des enrobés MB-16. Ainsi, bien que les enrobés MB-16 semblent bien se classer entre eux, ce modèle ne peut être retenu pour la sélection des enrobés et la conception. De plus, la pente du modèle global est de $-3,2$, ce qui est significativement plus faible en valeur absolue que les autres modèles, tel qu'on peut le constater aux figures 7.20 à 7.25 où les différents modèles développés dans le cadre de ce projet sont représentés en parallèle pour chaque type d'enrobés. Ces figures présentent l'écart entre les différents types de modèles développés dans le cadre de ce projet pour chaque type d'enrobé.

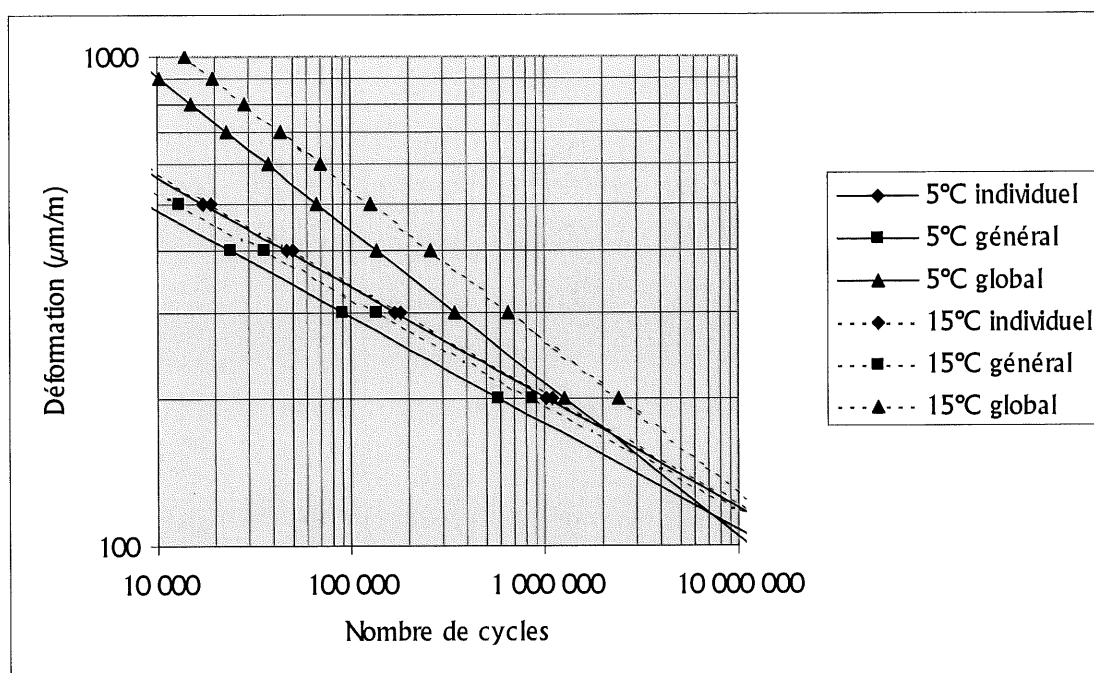


Figure 7.20 – Droites de fatigue individuelles, générales et globales pour l'enrobé GB-20 formulé avec un bitume conventionnel.

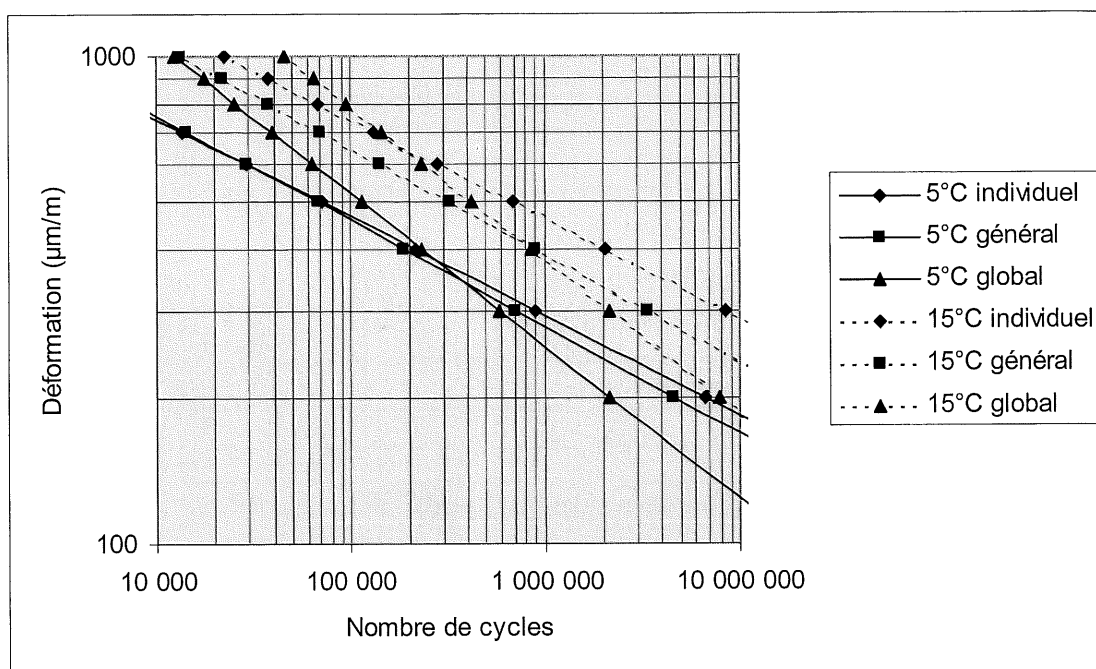


Figure 7.21 – Droites de fatigue individuelles, générales et globales pour l'enrobé GB-20 formulé avec un bitume modifié aux polymères.

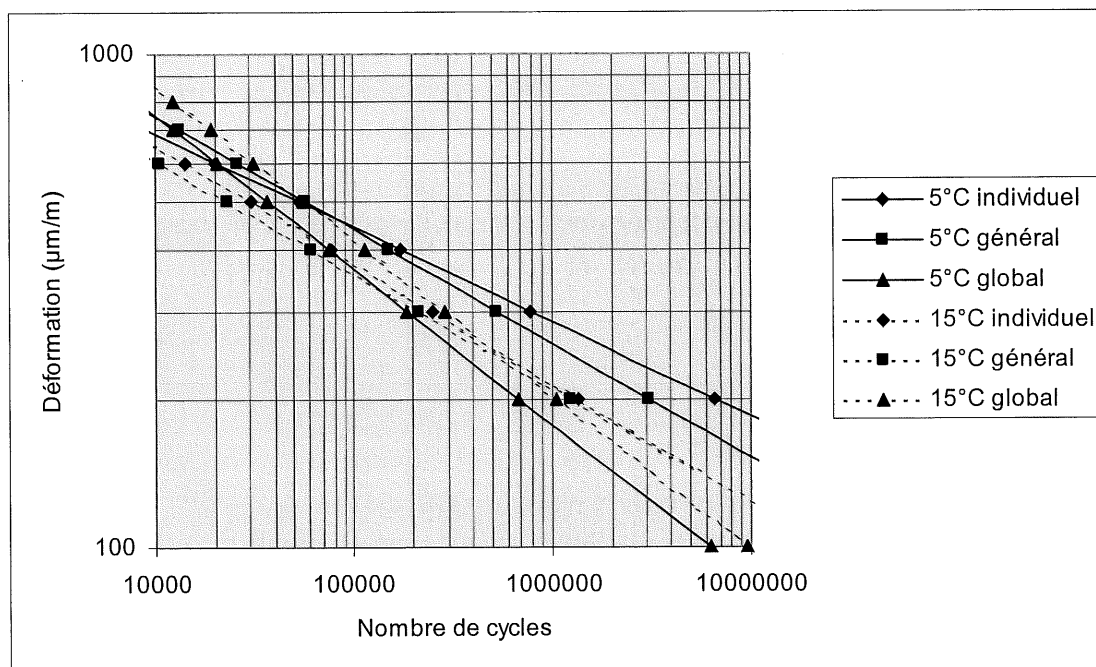


Figure 7.22 – Droites de fatigue individuelles, générales et globales pour l'enrobé MB-16 formulé avec un bitume 80/100.

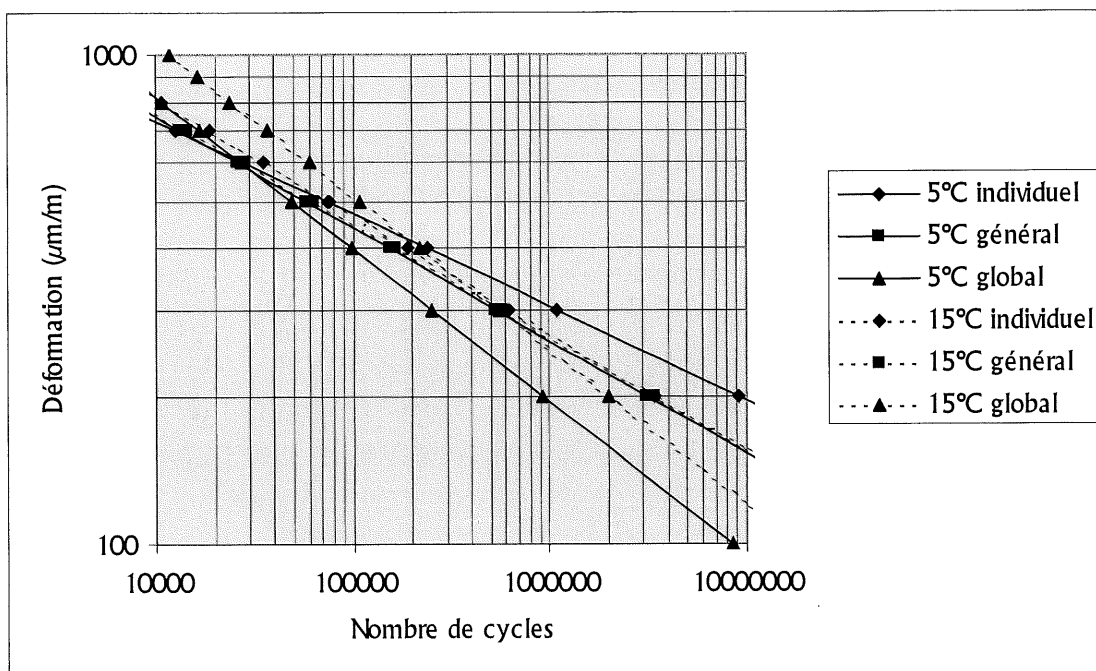


Figure 7.23 – Droites de fatigue individuelles, générales et globales pour l'enrobé MB-16 formulé avec un bitume MG 90.

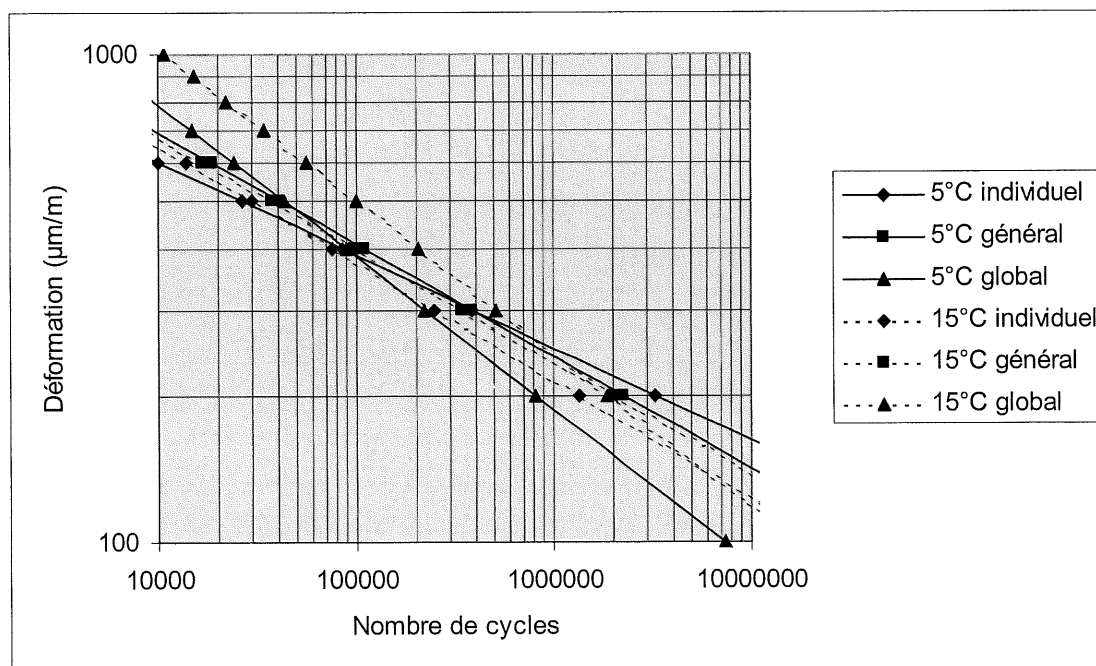


Figure 7.24 – Droites de fatigue individuelles, générales et globales pour l'enrobé MB-16 formulé avec un bitume 150/200.

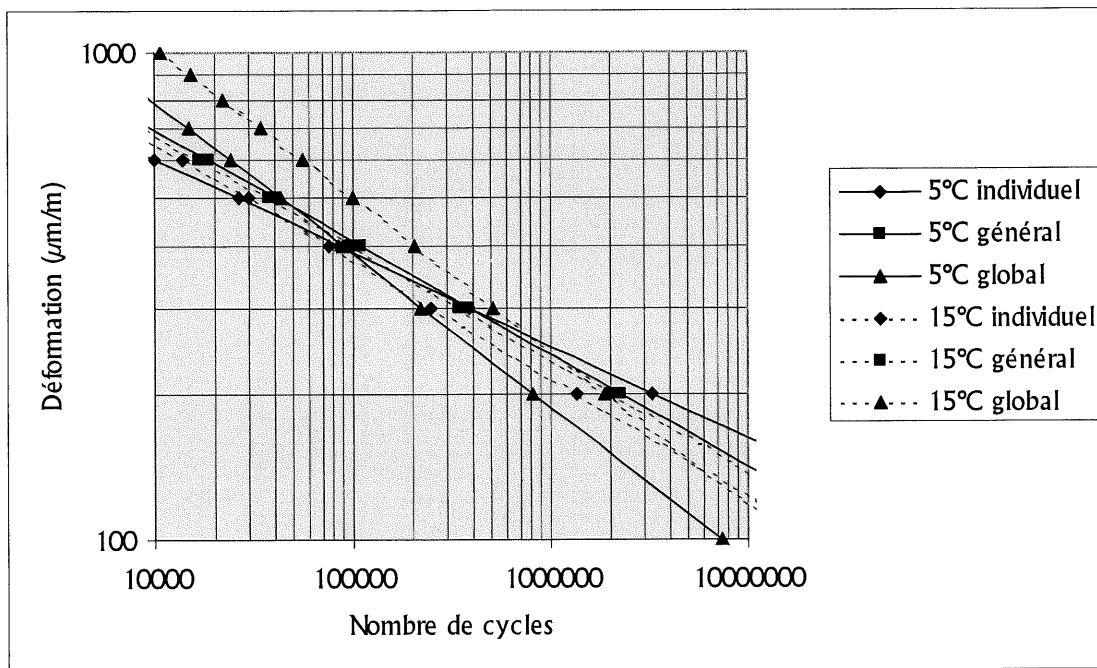


Figure 7.25 – Droites de fatigue individuelles, générales et globales pour l'enrobé MB-16 formulé avec un bitume MG 175.

On constate effectivement que, quel que soit le type d'enrobé étudié, le modèle global décrit un comportement significativement différent des modèles individuels et généraux. Par ailleurs, les modèles individuels et généraux semblent donner des indications similaires sur le comportement des différents enrobés, ce qui semble indiquer que la forme des modèles généraux est adéquate pour estimer la résistance à la fatigue des enrobés caractérisés dans le cadre de cette étude. Ainsi, pour la sélection des enrobés et éventuellement la conception, il est suggéré d'employer un modèle de type général qui s'applique à un seul type d'enrobé, puisqu'il s'agit du modèle le plus complet qu'il a été possible de développer dans le cadre de cette étude. En ce qui concerne le modèle global, il manque certains paramètres à l'équation concernant la volumétrie de l'enrobé pour le rendre fonctionnel. Les deux modèles généraux sont comparés aux modèles de la littérature et aux relations de Whöler de base à la section suivante.

7.2.2.3 Étude comparative

En troisième et finale partie de cette analyse sur les modèles de fatigue, les modèles généraux développés dans le cadre de ce projet pour les enrobés GB-20 et MB-16 sont comparés aux modèles de la littérature proposés par la pétrolière Shell, l'Asphalt Institute, Myre et le programme SHRP. Tous ces modèles sont également comparés aux relations de Whöler de base caractérisées en laboratoire sur les différents enrobés GB-20 et MB-16. On retrouve ces modèles au tableau 7.11 pour une température de 15°C et une fréquence de 10 Hz. Une température de 15°C a été retenue pour la comparaison puisque les résultats à 5°C semblent parfois divergeants. L'interaction entre les différents modèles est montrée aux figures 7.26 à 7.31 pour chaque type d'enrobé GB-20 et MB-16 étudié. Les modèles proposés par Shell et l'Asphalt Institute montrés sur les figures sont développés avec la valeur de rigidité dynamique E mesurée en laboratoire afin que tous les modèles aient la même base de comparaison.

Tableau 7.11 – Relations de Whöler à 15°C en fonction de la déformation ϵ ($\mu\text{m}/\text{m}$) pour les enrobés GB-20 et MB-16.

Type d'enrobé	Modèle	R ²	σ	DL
GB-20 conv	$N = 7,9 \cdot 10^{15} \epsilon^{-4,3}$	0,98	0,113	4
GB-20 poly	$N = 9,3 \cdot 10^{19} \epsilon^{-5,2}$	0,89	0,176	4
MB-16 80/100	$N = 1,0 \cdot 10^{13} \epsilon^{-3,2}$	0,99	0,052	2
MB-16 MG 90	$N = 1,0 \cdot 10^{17} \epsilon^{-4,4}$	0,88	0,224	3
MB-16 150/200	$N = 1,1 \cdot 10^{16} \epsilon^{-4,2}$	0,96	0,110	4
MB-16 MG 175	$N = 9,3 \cdot 10^{16} \epsilon^{-4,4}$	0,97	0,089	4

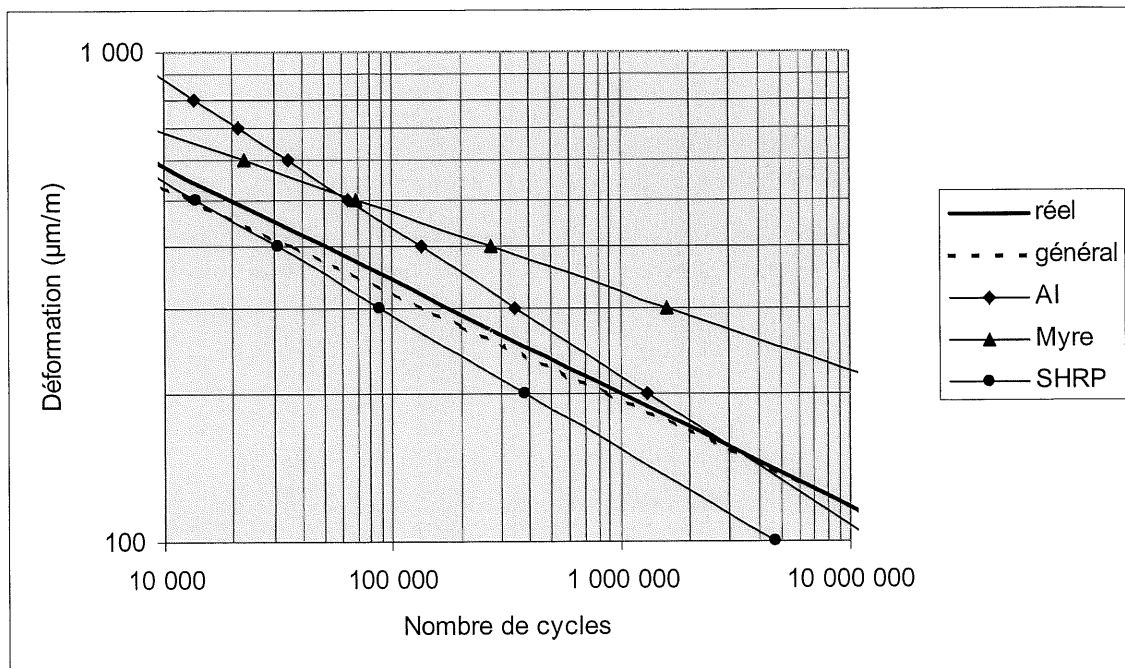


Figure 7.26 – Différents modèles de fatigue à 15°C pour l'enrobé GB-20 formulé avec un bitume conventionnel.

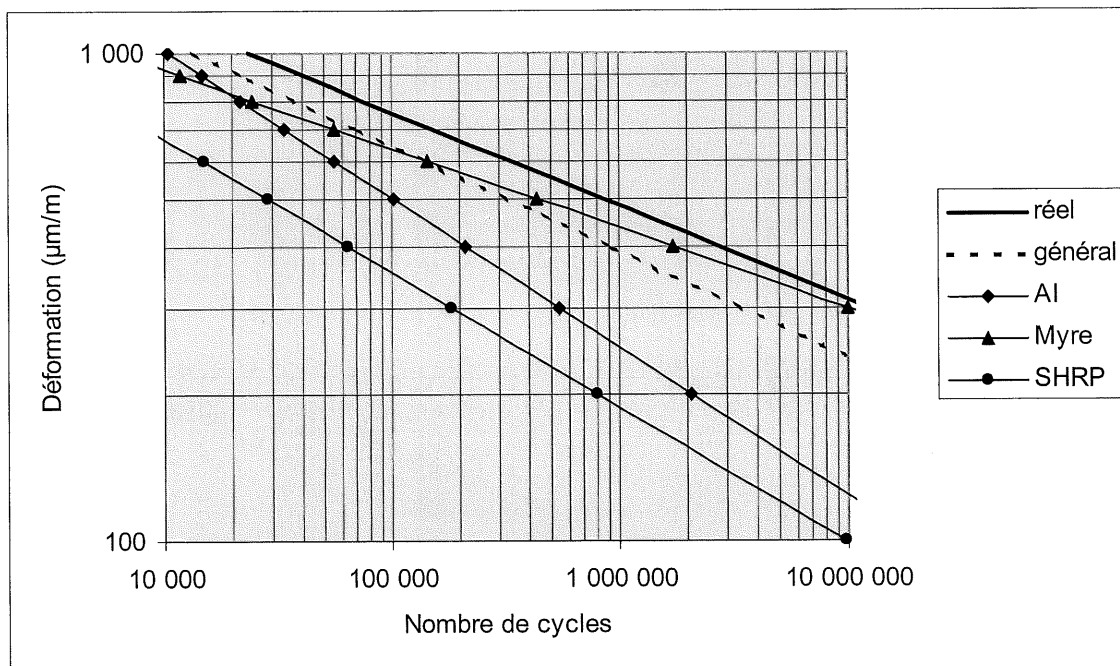


Figure 7.27 – Différents modèles de fatigue à 15°C pour l'enrobé GB-20 formulé avec un bitume polymère.

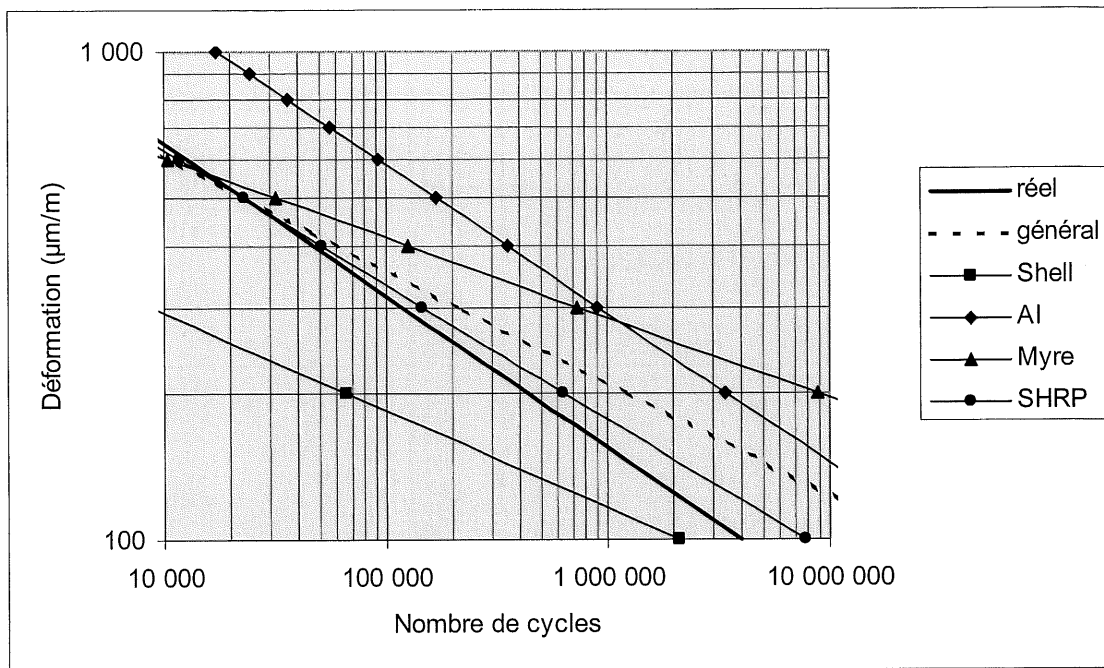


Figure 7.28 – Différents modèles de fatigue à 15°C pour l'enrobé MB-16 formulé avec un bitume 80/100.

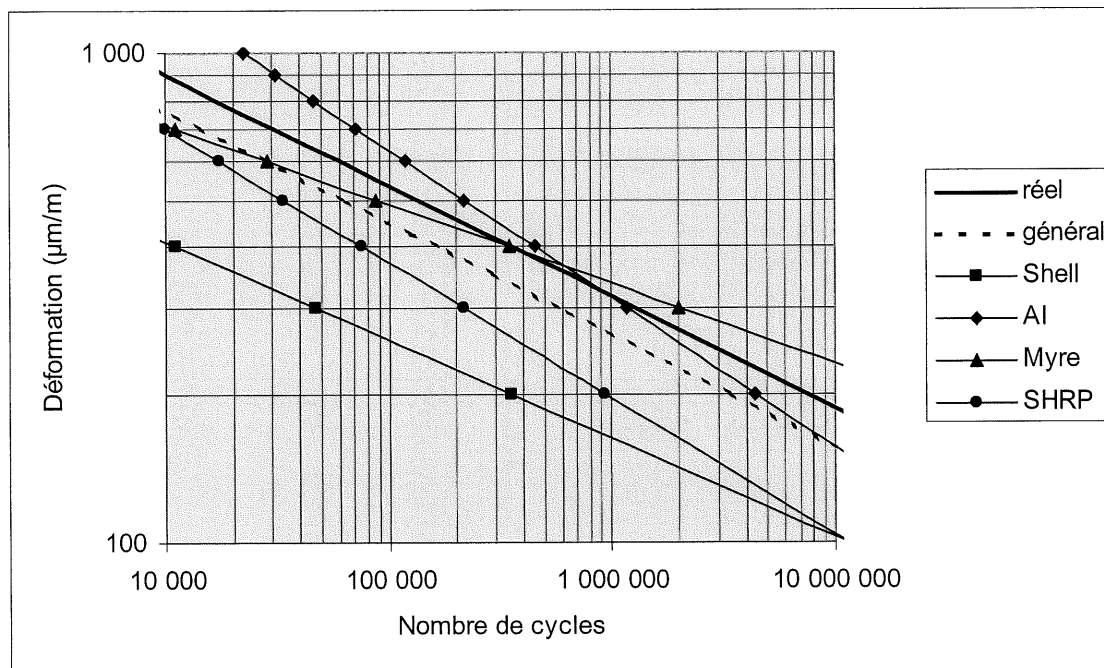


Figure 7.29 – Différents modèles de fatigue à 15°C pour l'enrobé MB-16 formulé avec un bitume MG 90.

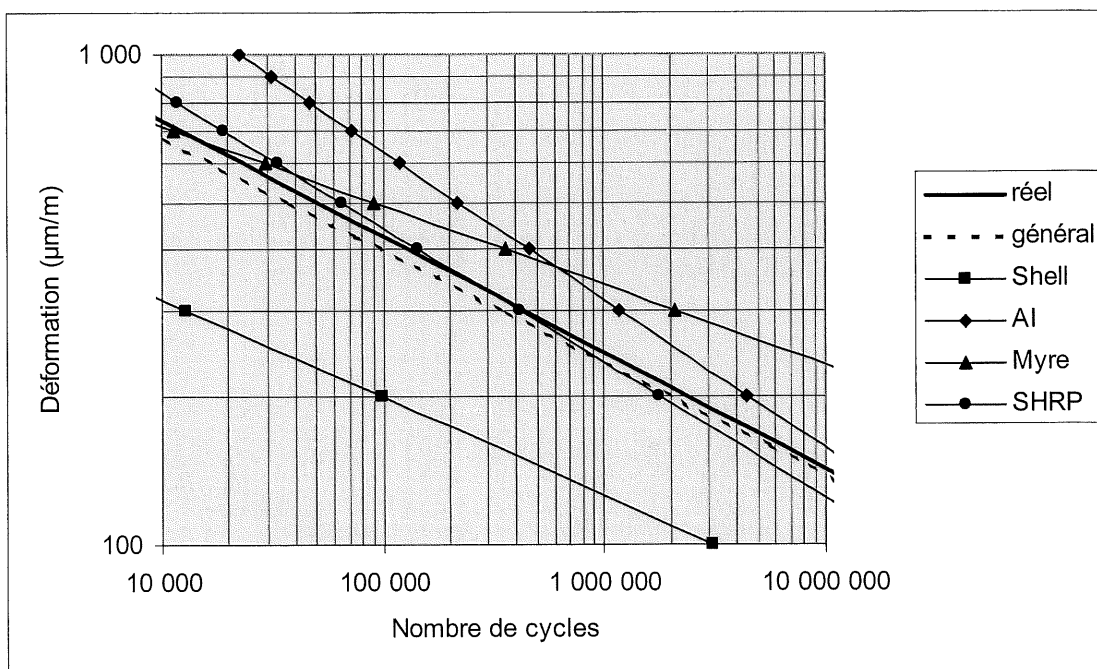


Figure 7.30 – Différents modèles de fatigue à 15°C pour l'enrobé MB-16 formulé avec un bitume 150/200.

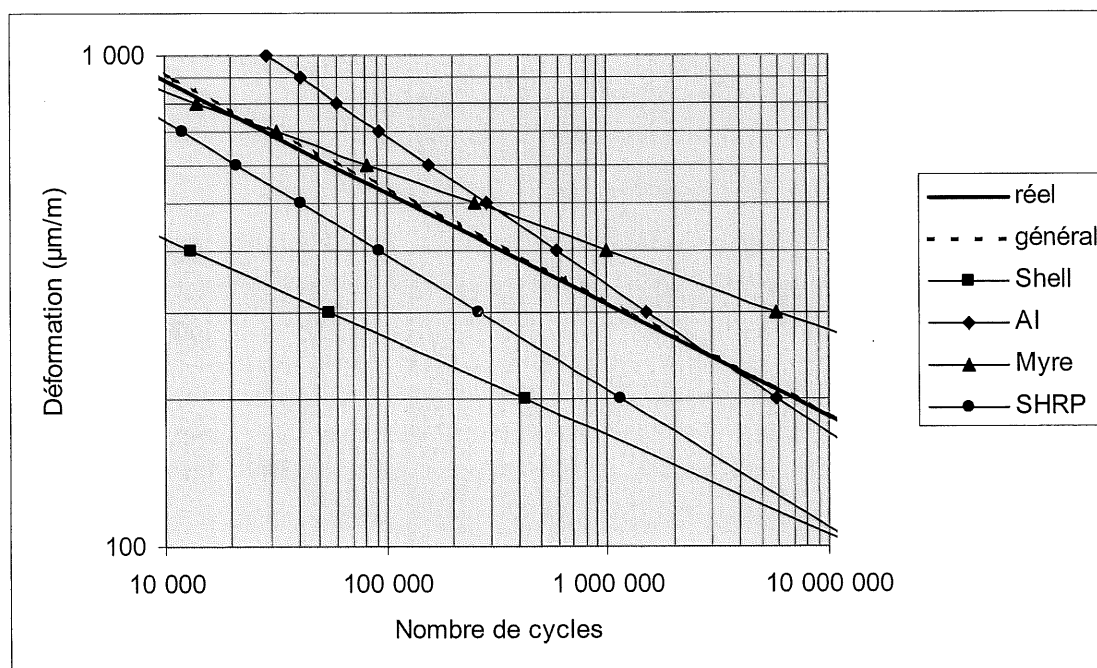


Figure 7.31 – Différents modèles de fatigue à 15°C pour l'enrobé MB-16 formulé avec un bitume MG 175.

Dans le cadre de cette étude comparative, on observe que la pente des différents modèles de fatigue est probablement le facteur qui influence le plus leur interaction. La position de chacun des modèles par rapport aux autres a peu d'importance puisque chacun de ces modèles nécessite un facteur d'ajustement pour représenter la relation entre le laboratoire et la route. Ainsi, il semble que le modèle de Myre qui présente une pente de $-6,1$ peut difficilement représenter les relations de Whöler qui présentent en moyenne une pente de $-4,3$. De même, le modèle de l'Asphalt Institute présente une pente de $-3,3$ qui semble également trop éloignée de la pente moyenne des relations de Whöler pour être recommandé. D'autre part, les modèles proposés par Shell avec une pente de $-5,0$ et par le SHRP avec une pente de $-3,6$ semblent mieux estimer les relations de Whöler obtenues. Par ailleurs, ces deux modèles ont chacun leur point faible, soit l'incapacité à évaluer le comportement de l'enrobé GB-20 par manque d'information sur le bitume dans le cas du modèle Shell et incapable de classer les enrobés à 5°C dans le cas du modèle SHRP. Par contre, le modèle SHRP semble classer de manière satisfaisante les enrobés à une température de 15°C selon les résultats obtenus en laboratoire. Ainsi, on pourrait envisager son utilisation à cette température.

Ainsi, les modèles qui permettent le plus convenablement d'estimer les relations de Whöler de base sont les modèles généraux développés dans le cadre de ce projet avec une pente moyenne de $-4,5$. Ces modèles ont été développés par type d'enrobé, ce qui permet d'estimer plus précisément les relations de base. Par ailleurs, ils sont développés à partir des relations de Whöler de base et leur potentiel pour estimer d'autres relations est inconnu. De ce fait, il est possible que les modèles de la littérature soient plus recommandables pour la conception d'autres types d'enrobés. L'aspect le plus important lors de la sélection d'un modèle est de s'assurer que la pente du modèle représente bien le type d'enrobé étudié. Si l'on considère que la pente est relativement constante pour la plupart des enrobés au Québec, il faut donc chercher des modèles avec une pente d'environ $-4,5$.

7.3 Recommandations

Suite à cette analyse, il est maintenant possible d'établir les lignes directrices pour le développement des modèles nécessaire à la conception des chaussées. Il est également possible de se positionner face aux modèles de la littérature puisque l'on dispose maintenant des moyens pour développer des modèles similaires.

7.3.1 Modèles généraux

Il semble qu'il soit possible de développer des modèles généraux fiables en restreignant leur portée. En effet, il est recommandé de développer ce type de modèle par famille d'enrobé plutôt que d'essayer de développer un modèle pour l'ensemble des enrobés. Lorsque la quantité de familles d'enrobés caractérisées sera suffisante, il sera alors possible de déterminer quels paramètres sont pertinents pour décrire la volumétrie de l'enrobé dans le but de développer un modèle global.

En ce qui concerne la description de la rigidité et de l'angle de phase de l'enrobé, il est recommandé d'exprimer ce type de modèle en fonction de la température T et du logarithme de la fréquence fr puisqu'il s'agit des paramètres qui sont variés lors de l'essai de balayage de fréquence. De plus, on peut ajouter des paramètres sous forme logarithmique pour décrire l'influence du type de bitume, tel que la rigidité E_b et l'angle de phase ϕ_b du bitume en cisaillement mesuré à l'aide de l'essai DSR aux mêmes températures que les essais de balayage de fréquence sur l'enrobé. La forme des modèles proposés est présentée par les équations 7.8 et 7.9.

$$E = 10^{(a + bT)} fr^c E_b^d \phi_b^e \quad (7.8)$$

$$\phi = 10^{(a + bT)} fr^c E_b^d \phi_b^e \quad (7.9)$$

Puisque les essais de balayage de fréquence sur les enrobés et les essais DSR sur le bitume sont simples et courts à exécuter, il est recommandé d'effectuer ces essais chaque fois qu'il est

possible de le faire afin d'accumuler des données sur la rigidité et l'angle de phase des enrobés le plus rapidement possible. Une routine d'essai minimale devrait couvrir les fréquences de 1, 3, 10 et 30 Hz et les températures de 5, 15 et 25°C.

En ce qui concerne la résistance à la fatigue, le modèle est développé en fonction de la température T et du logarithme de la déformation en tension ϵ pour une fréquence de chargement fixée à 10 Hz. L'influence de la température est décrite par une relation quadratique puisque sa distribution n'est pas toujours linéaire. De plus, on peut ajouter les valeurs logarithmiques de rigidité E et d'angle de phase ϕ de l'enrobé afin de décrire l'influence de sa rhéologie. La forme du modèle proposé est présentée par l'équation 7.10. Il est également recommandé de développer ces modèles par familles d'enrobés en attendant d'avoir suffisamment d'information pour ajouter des paramètres pour décrire l'influence de la volumétrie de l'enrobé sur un modèle global de fatigue.

$$N = 10^{(a + bT + cT^2)} \epsilon^d E^e \phi^f \quad (7.10)$$

Puisque les essais de fatigue sont longs et complexes à réaliser, il est recommandé qu'ils soient effectués avec discernement. La routine de caractérisation minimale devrait couvrir les températures de 5, 15 et 25°C pour une fréquence fixe de 10 Hz. Bien que la température de 15°C semble fiable pour la conception, il est important de caractériser les températures de 5 et 25°C afin de connaître l'influence de la température sur la résistance à la fatigue des enrobés. La température est généralement considérée comme le paramètre de l'environnement le plus influent sur la réaction de l'enrobé.

7.3.2 Modèles de la littérature

Il est important de considérer à leur juste valeur les modèles de la littérature puisqu'ils sont généralement fondés sur une grande quantité de résultats. Par ailleurs, les conditions d'essais associées à ces modèles sont presque toujours différentes de celles présentées dans ce projet, principalement en ce qui concerne le type d'appareillage employé et le type d'enrobé caractérisé. Ainsi, il est difficile de comparer ces modèles entre eux et de déterminer lesquels

représentent mieux la réalité. Puisqu'aucune méthode ne peut représenter fidèlement la réalité, il semble plus logique de recommander de sélectionner une méthode et de toujours l'employer de manière à la perfectionner. Cette étude comparative a permis de prendre confiance dans les modèles développés dans le cadre de ce projet. Leur pente et leur forme ainsi que le classement des enrobés semblent représenter la moyenne de ce qui est proposé dans la littérature. Ainsi, il est recommandé de poursuivre la caractérisation entreprise dans ce projet pour l'ensemble des enrobés posés au Québec et de développer une expertise basée sur l'essai de flexion de poutres aux tiers points.

En terminant, il est important de rappeler que les modèles de fatigue développés en laboratoire estiment un nombre de cycles à la rupture qui ne correspond pas à un nombre d'essieux sur la route. Ainsi, il faudrait envisager un programme d'étude dans le but de déterminer le facteur d'ajustement entre le laboratoire et la route. Pour le moment, les modèles de fatigue développés doivent être plutôt considérés pour le classement des enrobés. Par ailleurs, il faut se rappeler que ces équations sont développées à déformation constante et qu'il ne s'agit pas toujours du mode de sollicitation principal sur la route. Ainsi, il faudrait envisager un programme d'étude dans le but d'analyser les modèles de fatigue dans un contexte de dimensionnement de chaussées afin de mieux comprendre l'influence du mode de sollicitation sur le classement des enrobés.

8. CONCLUSION

Ce projet présente pour la première fois au Québec, une caractérisation en laboratoire de la rigidité, de l'angle de phase et de la résistance à la fatigue de différents enrobés. La caractérisation de ces paramètres s'inscrit dans l'évolution des méthodes de conception vers une approche méthodique (mécanistique) du dimensionnement et de l'analyse des chaussées. Cette conclusion n'a pas l'intention de revenir sur les recommandations que l'on retrouve à la fin de chaque chapitre d'analyse, mais plutôt d'identifier ce qui se dégage de ce premier exercice concernant la caractérisation de ces paramètres. La procédure pour la caractérisation de la rigidité, de l'angle de phase et de la résistance à la fatigue d'un enrobé retenue suite aux différentes recommandations se retrouve à l'annexe VII.

En ce qui concerne la rigidité et l'angle de phase, il semble clair que l'analyse des ces paramètres se fait conjointement dans l'optique de caractériser le module complexe de l'enrobé. Pour caractériser ces paramètres, il semble que l'essai de balayage de fréquence à faible niveau de déformation soit adéquat. L'angle de phase semble un bon indicateur de la performance en fatigue d'un enrobé.

En ce qui concerne la résistance à la fatigue, les modèles présentent généralement une pente de $-4,5$, ce qui semble représentatif du comportement anticipé d'un enrobé à 15°C . Par ailleurs, lorsque la température augmente ou diminue suffisamment, la résistance à la fatigue semble évoluer en sens inverse du comportement généralement anticipé, ce qui indique qu'une attention particulière devra être portée à l'influence de la température lors des prochaines études. D'autre part, le classement des modèles de fatigue semble bien représenté par la valeur de ϵ_6 , ce qui simplifie ce genre d'analyse. Par contre, en ce qui concerne la conception, il faut garder à l'esprit que les modèles développés dans le cadre de ce projet sont limités puisqu'ils représentent un nombre de cycles en laboratoire au lieu d'un nombre d'essieux sur la route. De plus, ils sont développés pour une déformation constante, ce qui n'est pas toujours le mode de sollicitation principal sur la route.

Les définitions alternatives de la rigidité initiale S_0 et de la rupture N_r de l'essai de fatigue semblent prometteuses. Elles permettent de définir la rupture par fatigue d'un enrobé en se concentrant principalement sur l'influence de sa rhéologie au lieu de ses propriétés thermiques. On constate que le rapport entre la rigidité initiale S_0 et la rigidité à la rupture S_r est pratiquement constant, ce qui semble intéressant pour le développement d'une approche fondamentale de la rupture par fatigue des matériaux viscoélastiques en laboratoire.

En dernier lieu, on peut rappeler que la contribution principale de ce projet est le développement d'une méthode pour la caractérisation en laboratoire au Québec de la rigidité, de l'angle de phase et de la résistance à la fatigue des enrobés, ce qui n'existait pas au début du projet. Il s'agit maintenant de valider la méthode et de développer des facteurs d'ajustements entre le laboratoire et la route.

RÉFÉRENCES

ALAVI S. & MONISMITH C. (1994) « Time and temperature dependent properties of asphalt concrete mixes tested as hollow cylinders and subjected to dynamic axial and shear loads », Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 63.

ASPHALT INSTITUTE (1981) « Thickness design – Asphalt pavements for highways and streets », manual series no 1.

BABURAMANI P. & POTTER D. (1996) « Dissipated energy approach to fatigue characteristics of asphalt mixes », proceedings, Roads 96 conference, part 2, p. 327-347.

BARKSDALE R. (1971) « Compressive stress pulse times in flexible pavements for use in dynamic testing », Highway Research Record 345, Highway research Board, pp. 32-44.

BRONSTEIN M. & SOUSA J. (1995) « ATS manual version 3.1 », Walnut Creek, CA, Strategic Highway Research Program, National Research Council.

BROWN S. (1978) « Material characteristics for analytical pavement design », Developments in highway pavement engineering, Essex, England, vol. I, p. 51-92.

BROWN S. (1978b) « Mechanical properties of bituminous materials », Asphalt technology, The journal of the institute of asphalt technology, no 25.

BROWN S. (1995) « Bituminous layers : Introduction to elastic stiffness and permanent deformation », Bituminous pavements : materials design and evaluation, University of Oulu, Publications of Road and Transport Laboratory, Oulu, Finland, p.119-137.

CHAPPAT M. & FERRARO MAIA A. (1997) « Pour y voir plus clair dans les essais SHRP et dans leur application aux bitumes polymères », RGRA no 753, p. 47-55.

CLAXTON M., LESAGE J., PLANQUE L. & GREEN P. (1996) « The use of binder rheological properties to predict the performance of asphalt mixes », proceedings, Roads 96 conference, part 2, p. 311-326.

COOPER K. & PELL P. (1969) « The effect of mix variables on the fatigue strength of bituminous materials », TRRL, laboratory report 633.

DEACON J., COPLANTZ J., TAYEBALI A. & MONISMITH C. (1994) « Temperature considerations in asphalt-aggregate mixture analysis and design », Transportation research record, no 1454, Washington DC.

DEACON J., HARVEY J., TAYEBALI A. & MONISMITH C. (1997) « Influence of binder loss modulus on the fatigue performance of asphalt concrete pavements », Journal of the association of asphalt paving technologists, vol 66, p. 632-685.

DEACON J., TAYEBALI A., ROWE G. & MONISMITH C. (1995) « Validation of SHRP A-003A flexural beam fatigue test », Engineering properties of asphalt mixtures and the relationship to their performance, Philadelphia, ASTM, STP 1265, p. 21-35.

DE LA ROCHE C. & MARSAC P. (1996) « Experimental characterisation of thermal dissipation in a bituminous mix tested in fatigue », Euraspahlt & Eurobitume congress, 13 p.

DE LA ROCHE C. (1996b) « Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux – Expérimentation et nouvelles perspectives d'analyse », Thèse, École Centrale Paris, 217 p.

DE LA ROCHE C. & RIVIERE N. (1997) « Fatigue behavior of asphalt mixes : influence of laboratory test procedures on fatigue performances », Eight international conference on asphalt pavements, proceedings, Seattle, Whashington, vol. II, p. 900-917.

DI BENEDETTO H., ASHAYER SOLTANI A. & CHAVEROT P. (1996) « Fatigue damage for bituminous mixtures: a pertinent approach », Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Baltimore, Maryland, vol. 65, p. 142-158.

DOAN T. (1977) « Les études de fatigue des enrobés bitumineux au LCPC », Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, spécial V, p. 215-228.

DORE G. & SAVARD Y. (1998) « Analysis of seasonal pavement deterioration », Transportation reasearch board, 77th annual meeting, proceedings, Whasington DC.

EBA ENGINEERING CONSULTANTS LTD (1994) « Construction report, Test roads C-SHRP project, Performance correlation for quality paving asphalts », Edmonton, 30 p.

FONSECA O. (1995) « Development of a time-dependant model for the dynamic modulus of asphalt mixes », Dissertation, Departement of Civil Engineering, University of Maryland, College Park, MD.

FRANCKEN L. & VANELSTRAETE A. (1996) « Complex moduli of bituminous binders and mixes interpretation and evaluation », Euraspahlt & Eurobitume congress.

GOODRICH J. (1991) « Asphaltic binder rheology, asphalt concrete rheology and asphalt concrete mix properties », Journal of the association of asphalt paving technologists, vol. 60.

HARVEY J. & MONISMITH C. (1993) « Effects of laboratory asphalt concrete specimen variables on fatigue and permanent deformation test results using strategic highway research program A-003A proposed testing equipment », Transportation research record, no 1417, Washington DC, p. 38-48.

HARVEY J., TAYEBALI A., DEACON J., LEAHY R. & MONISMITH C. (1997) « Areliability-based design and analysis system for mitigating fatigue distress », Eight international conference on asphalt pavements, proceedings, Seattle, Whashington, vol. I, p. 301-323.

HARVEY J. & TSAI B. (1996) « Effects of asphalt content and air void content on mix fatigue and stiffness », Transportation research record, no 1543, Whashington DC, p. 38-45.

HOPMAN P., KUNST P. & PRONK A. (1989) « A renewed interpretation method for fatigue measurements – Verification of Miner's rule », proceedings of the fourth Eurobitume symposium.

HUANG Y. (1993) « Pavement analysis and design », New Jersey, Prentice-Hall, 805 p.

HUANG H. & WHITE T. (1996) « Dynamic properties of fiber-modified overlay mixture », Transportation research record, no. 1545, Washington DC, p. 98-104.

HUET C. (1963) « Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés » Thèse, Paris.

HUHTALA M., ALKIO R., PIHLAJAMÄKI J., PIENIMÄKI M. & HALONEN P. (1990) « Behavior of bituminous materials under moving wheel loads », Association of Asphalt Paving Technologists, proceedings.

IRWIN L. & GALLAWAY B. (1974) « Influence of laboratory test method on fatigue test results for asphalt concrete », STP 561, American society for testing and materials, p. 12-46.

JUDYCKI J. (1991) « Fatigue of asphalt mixes », University of Oulu, Publications of road and transport laboratory, Oulu, Finland, 167 p.

KENNEDY T. (1977) « Characterization of asphalt pavement materials using the indirect tensile test », Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 46, p. 132-150.

KIM Y. & LEE Y. (1996) « Interrelationships among stiffnesses of asphalt-aggregate mixtures », Journal of the association of asphalt paving technologists, vol. 65, p. 575-609.

KONG KAM WA N., VERHAEGHE B., THEYSE H. & KNOTTENBELT E. (1997) « Stiffness and fatigue characteristics of some asphalt wearing courses used in south africa », Eight international conference on asphalt pavements, Seattle, Whashington, vol. II, p. 951-968.

LABORATOIRE DES PONTS ET CHAUSSÉES (LPC) & SERVICE D'ÉTUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES (SETRA). (1994) « Conception et dimensionnement des structures de chaussée (guide technique) », Paris.

LITTLE D., LYTTON R., WILLIAMS D. & KIM Y. (1997) « Propagation and healing of microcracks in asphalt concrete and their contributions to fatigue », Asphalt science and technology, New York, p.149-195.

LOIGNON B. & SAVARD Y. (1997) « Comportement des chaussées en fonction de la classe de performance du liant et du type d'accotement », compte-rendu du 32^e congrès annuel de l'association québécoise du transport et des routes AQTR, Trois-Rivières, Québec, p.44-68.

MAMLOUK M. & SAROFIM R. (1988) « The modulus at asphalt mixtures – An unresolved dilemma », Transportation research board, 67th annual meeting, proceedings, Whashington DC.

McLEAN D. (1974) « Permanent deformation characteristics of asphalt concrete » Ph. D. dissertation, University of California, Berkeley.

MOLENAAR A. (1995) « Principles of pavement performance », Bituminous pavements : materials design and evaluation, University of Oulu, Publications of Road and Transport Laboratory, Oulu, Finland, p.1-22.

MONISMITH C. & SALAM Y. (1973) « Distress characteristics of asphalt concrete mixtures », proceedings, Association of asphalt paving technologists, vol 42.

MOUTIER F. (1990) « L'essai de fatigue LPC : un essai vulgarisable? », Fourth international symposium on the mechanical tests for bituminous mixes, proceedings, Budapest, p. 540-560.

MYRE J. (1992) « Fatigue of asphalt materials for Nowegian conditions », Seventh international conference on asphalt pavements, proceedings, p. 238-251.

NUNN M. (1997) « Long life flexible roads », Eight international conference on asphalt pavements, proceedings, Seattle, Washington, vol. I, p. 3-15.

PELL P. (1987) « Keynote lecture – Pavement materials », Sixth international conference on the structural design and asphalt pavements, vol 2, p. 36-70.

PIAU J. (1989) « Modélisation thermomécanique du comportement des enrobés bitumineux », Bulletin de liaison, Laboratoire routiers des ponts et chaussées, no 163, p. 41-54.

POWELL W. & al. (1984) « The structural design of bituminous pavements », TRRL, Laboratory report 1132, U.K.

PRONK A. (1997) « Comparaison of 2 and point fatigue tests and healing in point dynamic bending test based on the dissipated energy concept », Eight international conference on asphalt pavements, proceedings, Seattle, Washington, vol. II, p. 987-994.

PROZZI J. & DE BEER M. (1997) « Mechanistic determination of equivalent damage factors for multiple load and axle configuration », Eight international conference on asphalt pavements, proceedings, Seattle, Washington, vol. I, p. 161-178.

RAITHBY K. & STERLING A. (1972) « Some effects of loading history on the performance of rolled asphalt », TRRL-LR 496, Crowthorne, England.

RAO TANGELLA S., CRAUS J., DEACON J. & MONISMITH C. (1990) « Summary report on fatigue response of asphalt mixtures », Report TM-UCB-A-003A-89-3 prepared for Strategic Highway Research Program, University of California, Berkeley.

REESE R. (1994) « Development of a physical property specification for asphalt-rubber binder », Journal of asphalt paving technologists, vol 63.

REESE R. (1997) « Properties of aged asphalt binder related to asphalt concrete fatigue life », Journal of the association of asphalt paving technologists, vol 66, p.604-632.

REESE R. & GOODRICH J. (1993) « California desert test road – A step closer to performance based specifications », Journal of asphalt paving technologists, vol 62.

RIVIÈRE N. (1996) « Comportement en fatigue des enrobés bitumineux », Thèse, Université de Bordeaux I, no. d'ordre 1495, École doctorale de physique et de l'ingénieur, 115 p.

ROWE G. & BROWN S. (1997) « Fatigue life prediction using visco-elastic analysis », Eight international conference on asphalt pavements, Seattle, Washington, vol. II, p. 1109-1122.

SAID S. (1995) « Tests and design parameters of elastic stiffness and permanent deformation », Bituminous pavements : materials design and evaluation, University of Oulu, Publications of Road and Transport Laboratory, Oulu, Finland, p.139-176.

SAUNIER J. (1968) « Autoréparation des enrobés bitumineux », RGRA, no 5, p. 69-72.

SCHMORAK N. & VAN DOMMELEN A. (1995) « Analysis of the structural behavior of asphalt concrete pavements in SHRP-NL test sections », International conference : SHRP and traffic safety, Prague.

SHELL (1978) « Shell pavement design manual – Asphalt pavements and overlays for road traffic », Shell international petroleum, London.

SOLIMAN S. (1976) « Influence des paramètres de formulation sur le comportement à la fatigue d'un enrobé bitumineux », Ministère de l'équipement, Laboratoire des ponts et chaussées, Paris, rapport de recherche no. 58, 103 p.

SOUSA J. & WEISSMAN S. (1994) « Modeling permanent deformation of asphalt-aggregate mixes », Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 63.

SOUSA J., PAIS J., PRATES M., BARROS R., LANGLOIS P. & LECLERC A. (1998) « Effect of aggregate gradation on fatigue life of asphalt concrete mixes », proceedings, Transportation research board, Washington DC.

TAYEBALI A., DEACON J., COPLANTZ J., HARVEY J., MONISMITH C. & FINN F. (1994) « Fatigue response of asphalt-aggregate mixes », SHRP-A-404, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 303 p.

TAYEBALI A., DEACON J. & MONISMITH C. (1996) « Development and evaluation of dynamic flexural beam fatigue test system », Transportation research record, no. 1545, p. 89-97.

TAYEBALI A., TSAI B. & MONISMITH C. (1994^b) « Stiffness of asphalt-aggregate mixes », SHRP-A-388, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 101 p.

THOMPSON M. (1987) « ILLI-PAVE based full-depth asphalt concrete pavement design procedure », proceedings, sixth international conference on structural design of asphalt pavements, vol 1, p. 13-22.

UGE P., GEST G., GRAVOIS A. & BONNAURE F. (1977) « Nouvelle méthode de calcul du module complexe des mélanges bitumineux », Bulletin de liaison, Laboratoire routiers des ponts et chaussées, spécial V, p. 199-214.

UNIVERSITY OF CALIFORNIA, OREGON STATE UNIVERSITY, AUSTIN RESEARCH ENGINEERS. (1994) *Accelerated performance-related tests for asphalt-aggregate mixes and their use in mix design and analysis systems*, Washington, DC, SHRP-A-417, Strategic Highway Research Program, National Research Council, 158 p.

VAN DIJK W. & VISSER W. (1977) « The energy approach to fatigue for pavement design », Proceedings, The association of asphalt paving technologists, vol 46.

VERSTRAETEN J., VEVERKA V. & FRANCKEN L. (1982) « Rational and practical designs of asphalt pavements to avoid cracking and rutting », proceedings, fifth international conference on the structural design of asphalt pavements.

VON QUINTUS H. (1994) « Performance prediction models in the superpave mix design system », SHRP-A-699, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 65 p.

WITCZAK M. & FONSECA O. (1996) « Revised predictive model for dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures », Transportation research record, no 1540, Washington DC, p.15-23.

ZHANG X. (1997) « A comparison of gelled asphalt and polymer modified asphalt », Research report, Heritage research group, 25 p.

ANNEXE I

Procédure pour l'essai de flexion de poutre aux tiers points.

PROCÉDURE POUR L'ESSAI DE FLEXION DE POUTRE AUX TIERS POINTS

Cette procédure permet à un opérateur d'effectuer des essais de balayage de fréquence et de fatigue avec l'appareil CS 7800 et le module de flexion de poutres avec chargement appliqué aux tiers points. On suppose que les routines d'essais que l'on désire employer sont programmées dans le logiciel avant d'employer cette procédure.

1. Démarrage de l'appareil

En assumant que le système est fermé, voici comment démarrer l'appareillage.

1. Ouvrir le robinet pour alimenter l'appareil en eau.
2. Mettre les interrupteurs à l'arrière de l'appareil et à l'arrière de la boîte moteur en position ON.
3. Appuyer sur les interrupteurs Power ON, Hydraulic ON et Actuator ON sur le devant de l'appareil.
4. Attendre 20 minutes avant de continuer.

L'appareil et l'ordinateur sont maintenant en fonction. Quatre fenêtres sont affichées à l'écran de l'ordinateur : ATS Québec, ATS Editor, ATS Report et ATS Scope.

5. Ouvrir le panneau en bas à droite et démarrer le compresseur en appuyant sur Start. S'assurer que les voyants OK sont allumés sur la pompe et le compresseur.
6. Sélectionner le menu Control dans la fenêtre ATS Québec et le menu Temp. Ajuster la température au niveau prévu pour l'essai.
7. Activer les menus suivant: Control-SVo, Display-Monitor et Control-Valve Offset.

Maintenant, on peut organiser l'écran afin de bien voir toutes les fenêtres qui sont activées.

2. Ajustement de la cellule de charge

Avant d'effectuer un essai, on s'assure que la force appliquée par la cellule de charge est suffisante, sans être importante. Cette composante se nomme « LOAD AX » dans le logiciel.

1. Mettre la commande SVo en mode « *stroke* ».
2. Activer le menu Control-Transducer et sélectionner Load ax dans la liste.
3. Appuyer sur le bouton ZERO jusqu'à ce que le « *load* » soit de 50 N.

Si c'est la première fois que vous utilisez l'appareil ou si un problème est survenu lors d'essais précédents, un deuxième ajustement de la cellule de charge est prévu à l'aide d'une poutre en bois.

4. Insérer la poutre selon la procédure de la section 3.
5. Ajuster la commande « *load* » dans Valve Offset à 50 N.
6. Enlever la poutre selon la procédure de la section 5.

3. Insertion de la poutre

Pour effectuer un essai, il faut insérer la poutre à caractériser dans l'appareil. Un conditionnement de 2 heures à la température de l'essai est prévu avant l'essai. Il est effectué dans la chambre climatisée de l'appareil.

1. Insérer une poutre à l'intérieur des quatre supports prévus à cette fin dans la chambre climatisée. Les supports sont maintenus en position verticale et équidistante par un guide amovible.
2. S'assurer que le lecteur de déplacement LVDT est au centre du butoir.
3. Mettre la commande SVo en mode « *load* ».

4. Fixer la poutre avec les pinces à l'aide de la boîte moteur en position Clamp et Normal. Commencer par serrer les pinces de côtés. Ensuite, relâcher légèrement la pression des pinces de côté et abaisser les pinces du dessus. Finalement, serrer toutes les pinces.
5. Vérifier que les quatre supports sont verticaux et bien alignés.
7. Vérifier que les pinces sont bien serrées avec la boîte moteur en position Clamp et High.
8. Mettre la boîte moteur en position Clamp et Normal.
9. Enlever le guide qui retient les supports.

La poutre est maintenant prête pour l'essai. Il faut également s'assurer que l'appareil est prêt à démarrer.

10. S'assurer que la commande « *load* » dans Valve Offset est à 50 N.
11. Ajuster le LVDT à l'aide de la clef pour que sa valeur soit près de zéro dans la fenêtre Valve Offset.

La poutre est maintenant prête pour effectuer un essai.

4. Essai de balayage de fréquence

Il faut maintenant sélectionner le type d'essai que l'on désire effectuer. L'essai de balayage de fréquence sera effectué en premier puisque l'on peut conserver la même poutre pour effectuer l'essai de fatigue par la suite.

1. Activer le menu Test-Edit.
2. Sélectionner le fichier.tst qui correspond à l'essai que l'on désire effectuer.
3. Nommer le fichier d'acquisition des données.
4. Sélectionner le fichier pour entrer les dimensions de l'échantillon. Choisir le fichier M009DIM.spc pour une poutre rectangulaire.
5. Activer la case fichier.tst. Un « x » apparaît dans la case.
6. S'assurer que le LVDT est près de zéro et activer le menu Test-Start.

L'essai de balayage de fréquence ne prend que quelques minutes. Lorsque l'essai est terminé, on enlève la poutre selon la procédure de la section 6 ou l'on effectue un autre essai de balayage de fréquence ou un essai de fatigue selon la procédure de la section 5.

5. Essai de fatigue

L'essai de fatigue se déroule selon la procédure suivante. Si le lecteur de déplacement LVDT est trop loin de zéro, on doit l'ajuster.

1. Mettre la commande SVo en mode « *stroke* ».
2. Ajuster le LVDT à l'aide de la clef pour que sa valeur soit près de zéro dans la fenêtre Valve Offset.
3. Mettre la commande SVo en mode « *load* ».

Une fois le lecteur de déplacement LVDT près de zéro, on peut démarrer l'essai de fatigue.

4. Activer le menu Test-Edit.
5. Sélectionner le fichier.tst qui correspond à l'essai que l'on désire effectuer.
6. Activer la case current value. Un « x » apparaît dans la case.
7. Inscrire « 90 » dans la case phase (deg).
8. Activer le menu Save-Run.
9. Nommer le fichier d'acquisition des données.
10. Sélectionner le fichier pour entrer les dimensions de l'échantillon. Choisir le fichier M009DIM.spc pour une poutre rectangulaire.
11. Activer la case fichier.tst. Un "x" apparaît dans la case.
12. S'assurer que le LVDT est près de zéro et activer le menu Test-Start.

Lorsque la force nécessaire pour effectuer le déplacement atteint la moitié de la force initiale pour le même déplacement, on arrête l'essai.

13. Sélectionner la case fichier.tst.

14. Activer le menu Test-Stop.
15. Mettre la commande SVo en mode « *stroke* ».

6. Retrait de la poutre

Lorsque l'essai est terminé, il reste à retirer la poutre de l'appareil.

1. Mettre la commande SVo en mode « *stroke* ».
2. Remettre le guide sur les supports.
3. Remonter le LVDT à l'aide de la clef.
4. Desserrer les pinces à l'aide de la boîte moteur en position Clamp et Normal (ou position High si les pinces sont collées).
5. Enlever la poutre.

7. Analyse des fichiers

À chaque essai, le logiciel enregistre dans un fichier les données. Pour utiliser le fichier, il est préférable de l'analyser à l'aide du logiciel.

1. Activer le menu Analyze-Save.
- 2.
3. Nommer le fichier d'acquisition de l'analyse.

8. Fermeture

Lorsque tous les essais sont terminés, on peut fermer l'appareil.

1. Ouvrir le panneau en bas à droite et arrêter le compresseur en appuyant sur Stop.
2. Appuyer sur les interrupteurs Hydraulic OFF et Actuator OFF sur le devant de l'appareil.

3. Fermer le robinet de l'alimentation en eau.
4. Mettre l'interrupteur en position OFF à l'arrière de la boîte moteur.
5. Appuyer sur le bouton Power OFF.

ANNEXE II

Données sur les enrobés employés pour l'étude de la fabrication des poutres.

No. contrat: 1021 Centrale no.: 078													Producteur: Construction DJL Inc.		Type de mélange: EB-10S		Type de bitume: 80-100		Facteur de justesse: DGB		0.15 2.709		
ÉCHANTILLON		GRANULOMÉTRIE (% PASSANT)												T G	%	FBE	% de vide	% de VCB	Stabi- lité	Défor- mation	DENSITÉS		SST
Numéro		Tamis en millimètres																			brute		
échantillon		31.5	28	20	14	10	5	2,5	1,25	0,630	0,315	0,160	0,080		Bitume								
97-MB-33		100	100	100	100	97	63.8	48	39	30	18	8	4.1	508	4.82	7.64	3.6	74.5	17660	2.2	2.440	2.532	6.00
Formule		100	100	100	100	96	60.0	45	34	26	16	8	4.0	489	4.90	8.30	3.5	75.6	11852	3.3	2.442	2.530	5.60
écart mesuré (ef/m)		0	0	0	0	1	3.8	3	5	4	2	0	0.1	19	0.08	0.66	0.1	1.1			0.002	0.002	0.40
écart tolérable (et)															0.50								
écart critique (ec)						7.0							1.7										
FUSEAU Minimum					100	92	50	27	18	12	8	5	4		4.80		2		9000				
Maximum					100	100	65	50	42	35	26	17	10				5	85.0					
REMARQUES:																							
Échantillon prélevé en 1996																							
Briques fabriquées à 150 C																							

No. contrat: 1021		Producteur: Simard-Beaudry inc.		Facteur de justesse: 0.15																			
Centrale no.: 139		Type de mélange: EG-10		DGB 2.713																			
		Type de bitume: Styrelf 13																					
ÉCHANTILLON		GRANULOMÉTRIE (% PASSANT)												T G	%	FBE	% de vide	% de VCB	Stabi- lité	Défor- mation	DENSITÉS		SST
Numéro échantillon		Tamis en millimètres																			brute		
		31.5	28	20	14	10	5	2,5	1,25	0,630	0,315	0,160	0,080	461	5.56	8.18	0.7	94.6	17277	6.6	2.493	2.511	6.49
97-MB-34		100	100	100	100	97	50.6	36	26	19	14	11	7.3	431	5.50	10.04						2.515	5.20
Formule		100	100	100	100	97	45.0	30	20	14	11	8	6.0	30	0.06	1.85	0.7	94.6			2.493	0.004	1.29
écart mesuré (ef/m)		0	0	0	0	0	5.6	6	6	5	3	3	1.3	30	0.06	1.85	0.7	94.6			2.493	0.004	1.29
écart tolérable (et)																							
écart critlque (ec)							7.0						1.7		0.50								
FUSEAU Minimum					100	85	40						5		5.40								
Maximum					100	100	50						12										
REMARQUES:																							
Échantillon prélevé en 1996																							
Briquettes fabriquées à 165 C, mélange formulé à la PCG																							

No. contrat: 1021 Centrale no.: 078		Producteur: Construction DJL Inc. Type de mélange: EB-20 Type de bitume: PG 58-22		Facteur de justesse: 0.15 DGB 2.716																			
ÉCHANTILLON		GRANULOMÉTRIE (% PASSANT)												T G	%	FBE	% de vide	% de VCB	Stabi- lité	Défor- mation	DENSITÉS		SST
Numéro échantillon		Tamis en millimètres																			Bitume	brute	
		31.5	28	20	14	10	5	2.5	1.25	0.630	0.315	0.160	0.080										
97-MB-32		100	100	99	76	72	65.4	40	30	23	14	7	3.7	420	4.37	8.62	2.4	81.2	19602	2.3	2.480	2.540	6.05
Formule		100	100	99	80	62	50.0	38	29	22	14	7	3.5	405	4.30	8.02	3.4	73.3	18870	3.0	2.477	2.564	4.90
écart mesuré (ef/m)		0	0	0	4	10	5.4	2	1	1	0	0	0.2	15	0.07	0.60	1.0	7.9			0.003	0.024	0.15
écart tolérable (et)																							
écart critique (ec)							10.0						1.7		0.50								
FUSEAU Minimum			100	95	65	48	34	24	16	9	6	4	3		4.20		2		9000				
Maximum			100	100	88	78	55	45	39	31	23	15	8				5	85.0					
REMARQUES: Échantillon prélevé en 1996 Briquettes fabriquées à 160 C																							



Préparation des mélanges hydrocarbonés
Partie 2 : Compactage des plaques
(Norme française)

NORME: NF P 98-250-2 (Novembre 1991)

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
ref. 96-945		

Boîte de mélange	Formulation
Enrobé : EB-10S	Enrobé :
T° chauffage (°C) : 155°	Masse(g) granulat : T(°C) =
% compaction (prévu) : 92%	Type de bitume :
Densité maximale (1) : 2.530	% bitume :
Note: <u>Compaction faible</u>	Masse(g) du bitume : T(°C) =
	Masse(g) (autre) :
	% compaction (prévu) :
	Densité maximale (1) :

* Vérification des rides pour pontures de fatigue

Masse à prélever (avant compaction)				
Hauteur de la plaque	V (moule) cm ³	Densité max.	% comp. prévu	Masse à prélever (g)
	V	Dmax	%C	M = V * Dmax * %C/100
50mm	4500			
100mm	9000	2.530	92	20948

% Compaction réel (%Cr) (après fabrication de la plaque)				
Numéro de la plaque	Rejet (g)	Masse réelle (g)	Masse (g) à 0%V	%Compaction réel
	R	Mr = M - R	M0 = V * Dmax	%Cr = (Mr / M0) * 100
1	841	20107	22770	88.3 %

(1) : Selon la norme NQ 2300-045 (87/12/15)

Point de vérification (PV)	
	Cochez
Ligne 7 (après exécution) vérifier le total cumulé	4-3-4
Ligne 11 (après exécution) vérifier le total cumulé	26-14-26
Ligne 15 (après exécution) vérifier le total cumulé	34-24-34

Equipements	
Balance no: 002187	Etuve no: 000247
Mélangeur no: 001846	Etuve no: 002331
Compacteur no: 002540	Autres no:

Essai effectué par:	Marc Bureau F. O. N. Doreet
Date de l'essai:	97-06-04

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

(MICROSOFT EXCEL) 26 MARS 1996



Préparation des mélanges hydrocarbonés
Partie 2 : Compactage des plaques
(Norme française)

NORME: NF P 98-250-2 (Novembre 1991)

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
ref. 96-945		

Boîte de mélange	Formulation
Enrobé : ER-10S	Enrobé :
T° chauffage (°C) : 155°	Masse(g) granulat : T(°C) =
% compaction (prévu) : 95%	Type de bitume :
Densité maximale (1) : 2,530	% bitume :
	Masse(g) du bitume : T(°C) =
	Masse(g) (autre) :
	% compaction (prévu) :
	Densité maximale (1) :

Note: Compactage fort

* Vérification des vides pour pontures de fatigue

Masse à prélever (avant compaction)

Hauteur de la plaque	V (moule) cm ³	Densité max.	% comp. prévu	Masse à prélever (g)
	V	Dmax	%C	M = V * Dmax * %C/100
50mm	4500	2,530	95	
100mm	9000	2,530	95	21632

% Compaction réel (%Cr) (après fabrication de la plaque)

Numero de la plaque	Rejet (g)	Masse réelle (g)	Masse (g) à 0%V	%Compaction réel
	R	Mr = M - R	M0 = V * Dmax	%Cr = (Mr / M0) * 100
5	472	21160	22770	92.9 %

(1) : Selon la norme NQ 2300-045 (87/12/15)

Point de vérification (PV)

	Cochez
Ligne 7 (après exécution) vérifier le total cumulé	4-3-4
Ligne 11 (après exécution) vérifier le total cumulé	26-14-26
Ligne 15 (après exécution) vérifier le total cumulé	34-24-34

Equipements

Balance no: 002187	Etuve no: 000247
Mélangeur no: 001846	Etuve no: 002331
Compacteur no: 002540	Autres no:

Essai effectué par:

Marie Peron
Félix Doucet

Date de l'essai:

97-06-04

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

(MICROSOFT EXCEL) 26 MARS 1996



Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports

Direction Lab. des chaussées

Préparation des mélanges hydrocarbonés
Partie 2 : Compactage des plaques
(Norme française)

NORME: NF P 98-250-2 (Novembre 1991)

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
96-945		

Boîte de mélange	Formulation
Enrobé : EB-10 S	Enrobé :
T° chauffage (°C) : 155°	Masse(g) granulat : T(°C) =
% compaction (prévu) : 90%	Type de bitume :
Densité maximale (1) : 2.530	% bitume :
Note: Compactage faible	Masse(g) du bitume : T(°C) =
	Masse(g) (autre) :
	% compaction (prévu) :
	Densité maximale (1) :

Masse à prélever (avant compaction)				
Hauteur de la plaque	V (moule) cm ³	Densité max.	% comp. prévu	Masse à prélever (g)
	V	Dmax	%C	M = V * Dmax * %C/100
50mm	4500			
100mm	9000	2.530	90	20493

% Compaction réel (%Cr) (après fabrication de la plaque)				
Numero de la plaque	Rejet (g)	Masse réelle (g)	Masse (g) à 0%V	%Compaction réel
	R	Mr = M - R	M0 = V * Dmax	%Cr = (Mr / M0) * 100
	419	20074	22770	88.2 %

(1) : Selon la norme NQ 2300-045 (87/12/15)

Point de vérification (PV)	
	Cochez
Ligne 7 (après exécution) vérifier le total cumulé	4-3-4
Ligne 11 (après exécution) vérifier le total cumulé	26-14-26
Ligne 15 (après exécution) vérifier le total cumulé	34-24-34

Equipements	
Balance no: 002187	Etuve no: 000247
Mélangeur no: 001846	Etuve no: 002331
Compacteur no: 002540	Autres no:

Essai effectué par:	Felix Doucet
	Maie Penon
Date de l'essai:	17 juin 97

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

(MICROSOFT EXCEL) 26 MARS 1996

Préparation des mélanges hydrocarbonés
Partie 2 : Compactage des plaques
(Norme française)

NORME: NF P 98-250-2 (Novembre 1991)

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
Ref 96-945		

Boîte de mélange	Formulation
Enrobé : EG-10 P	Enrobé :
T° chauffage (°C) : 165	Masse(g) granulat : T(°C) =
% compaction (prévu) : 90%	Type de bitume :
Densité maximale (1) : 2.515	% bitume :
Note: <u>Compactage faible</u>	Masse(g) du bitume : T(°C) =
	Masse(g) (autre) :
	% compaction (prévu) :
	Densité maximale (1) :

Masse à prélever (avant compaction)

Hauteur de la plaque	V (moule) cm ³	Densité max.	% comp. prévu	Masse à prélever (g)
	V	Dmax	%C	M = V * Dmax * %C / 100
50mm	4500			
100mm	9000	2.515	90	20372

% Compaction réel (%Cr) (après fabrication de la plaque)

Numero de la plaque	Rejet (g)	Masse réelle (g)	Masse (g) à 0%V	%Compaction réel
	R	Mr = M - R	M0 = V * Dmax	%Cr = (Mr / M0) * 100
	0	—	—	90 %

(1) : Selon la norme NQ 2300-045 (87/12/15)

Point de vérification (PV)

	Cochez
Ligne 7 (après exécution) vérifier le total cumulé	4-3-4
Ligne 11 (après exécution) vérifier le total cumulé	26-14-26
Ligne 15 (après exécution) vérifier le total cumulé	34-24-34

Equipements

Balance no: 002187	Étuve no: 000247
Mélangeur no: 001846	Étuve no: 002331
Compacteur no: 002540	Autres no:

Essai effectué par:

Date de l'essai:

 W. Penon
 Serge Charbon
 17 ju 97

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

Préparation des mélanges hydrocarbonés
Partie 2 : Compactage des plaques
(Norme française)

NORME: NF P 98-250-2 (Novembre 1991)

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
Ref 96-945		

Boîte de mélange	Formulation
Enrobé : EB - 20	Enrobé :
T° chauffage (°C) : 155°	Masse(g) granulat : T(°C) =
% compaction (prévu) : 90%	Type de bitume :
Densité maximale (1): 2,561	% bitume :
Note: <u>Compactage faible</u>	Masse(g) du bitume : T(°C) =
	Masse(g) (autre) :
	% compaction (prévu) :
	Densité maximale (1):

Masse à prélever (avant compaction)				
Hauteur de la plaque	V (moule) cm ³	Densité max.	% comp. prévu	Masse à prélever (g)
	V	Dmax	%C	M = V * Dmax * %C / 100
50mm	4500			
100mm	9000	2,561	90	20744

% Compaction réel (%Cr) (après fabrication de la plaque)				
Numero de la plaque	Rejet (g)	Masse réelle (g)	Masse (g) à 0%V	%Compaction réel
	R	Mr = M - R	M0 = V * Dmax	%Cr = (Mr / M0) * 100
	326	20418	23049	88.6%

(1) : Selon la norme NQ 2300-045 (87/12/15)

Point de vérification (PV)	
	Cochez
Ligne 7 (après exécution) vérifier le total cumulé	4-3-4
Ligne 11 (après exécution) vérifier le total cumulé	26-14-26
Ligne 15 (après exécution) vérifier le total cumulé	34-24-34

Equipements	
Balance no: 002187	Étuve no: 000247
Mélangeur no: 001846	Étuve no: 002331
Compacteur no: 002540	Autres no:

Essai effectué par:	<u>Felix Daxel</u>
	<u>Marc Penon</u>
Date de l'essai:	17 juin 97

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

(MICROSOFT EXCEL) 26 MARS 1996

Distribution de la compacité dans une plaque d'enrobé EB-10S faiblement compactée (88,2%)

Compacité globale (100 mm)

Position	D brute	D max	Comp
1	2,319	2,530	91,7
2	2,316	2,530	91,5
3	2,317	2,530	91,6
Moyenne	2,317	2,530	91,6

Compacité centrale (50 mm)

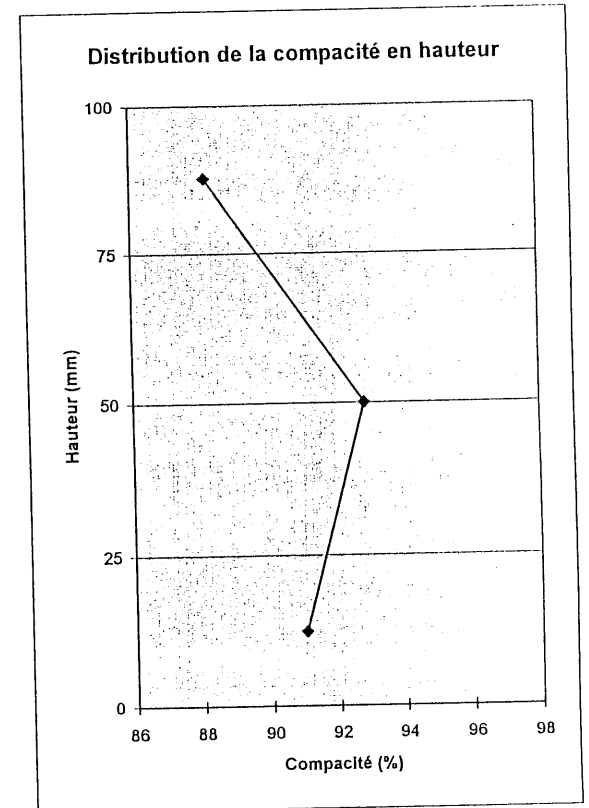
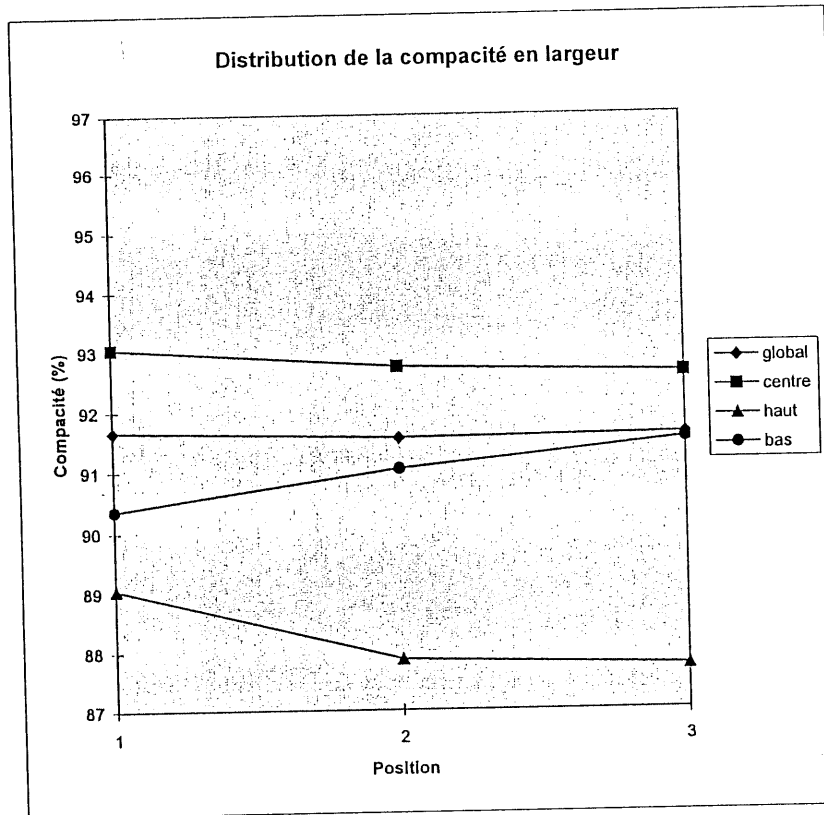
Position	D brute	D max	Comp
1	2,354	2,530	93,0
2	2,346	2,530	92,7
3	2,343	2,530	92,6
Moyenne	2,348	2,530	92,8

Compacité haut (25 mm)

Position	D brute	D max	Comp
1	2,253	2,530	89,1
2	2,223	2,530	87,9
3	2,220	2,530	87,7
Moyenne	2,232	2,530	88,2

Compacité bas (25 mm)

Position	D brute	D max	Comp
1	2,286	2,530	90,4
2	2,303	2,530	91,0
3	2,315	2,530	91,5
Moyenne	2,301	2,530	91,0



Distribution de la compacité dans une plaque d'enrobé EG-10p faiblement compactée (90,0%)

Compacité globale (100 mm)

Position	D brute	D max	Comp
1	2,384	2,515	94,8
2	2,397	2,515	95,3
3	2,391	2,515	95,1
Moyenne	2,391	2,515	95,1

Compacité centrale (50 mm)

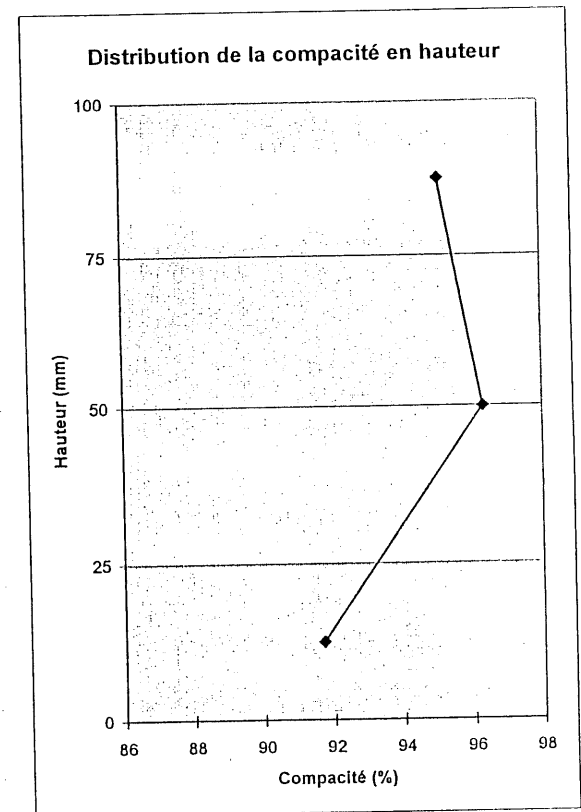
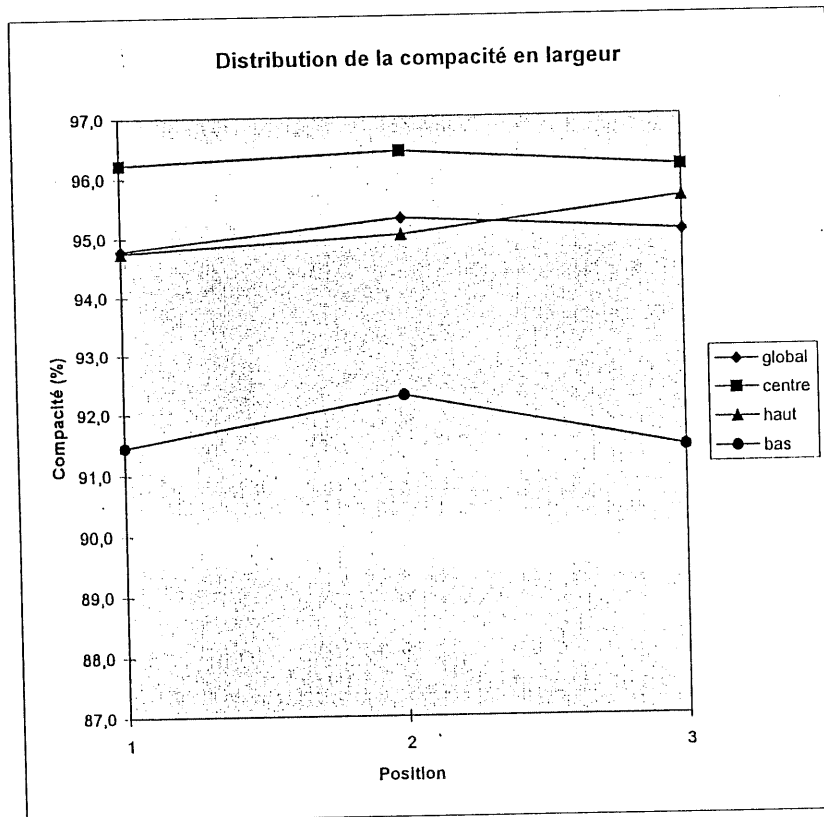
Position	D brute	D max	Comp
1	2,420	2,515	96,2
2	2,425	2,515	96,4
3	2,418	2,515	96,1
Moyenne	2,421	2,515	96,3

Compacité haut (25 mm)

Position	D brute	D max	Comp
1	2,383	2,515	94,8
2	2,390	2,515	95,0
3	2,405	2,515	95,6
Moyenne	2,393	2,515	95,1

Compacité bas (25 mm)

Position	D brute	D max	Comp
1	2,300	2,515	91,5
2	2,321	2,515	92,3
3	2,299	2,515	91,4
Moyenne	2,307	2,515	91,7



Distribution de la compacité dans une plaque d'enrobé EB-20 faiblement compactée (88,6%)

Compacité globale (100 mm)

Position	D brute	D max	Comp
1	2,346	2,561	91,6
2	2,347	2,561	91,6
3	2,366	2,561	92,4
Moyenne	2,353	2,561	91,9

Compacité centrale (50 mm)

Position	D brute	D max	Comp
1	2,374	2,561	92,7
2	2,380	2,561	92,9
3	2,404	2,561	93,9
Moyenne	2,386	2,561	93,2

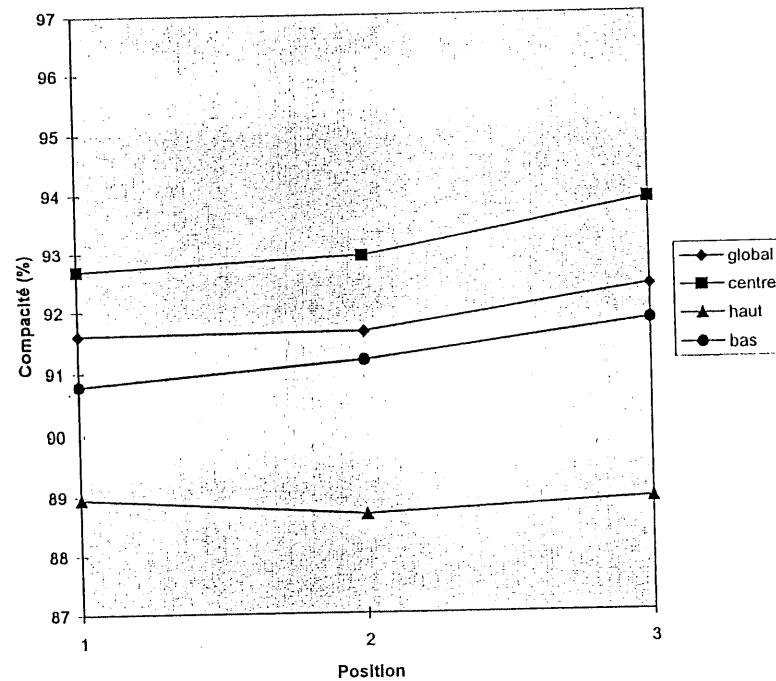
Compacité haut (25 mm)

Position	D brute	D max	Comp
1	2,278	2,561	88,9
2	2,271	2,561	88,7
3	2,277	2,561	88,9
Moyenne	2,275	2,561	88,8

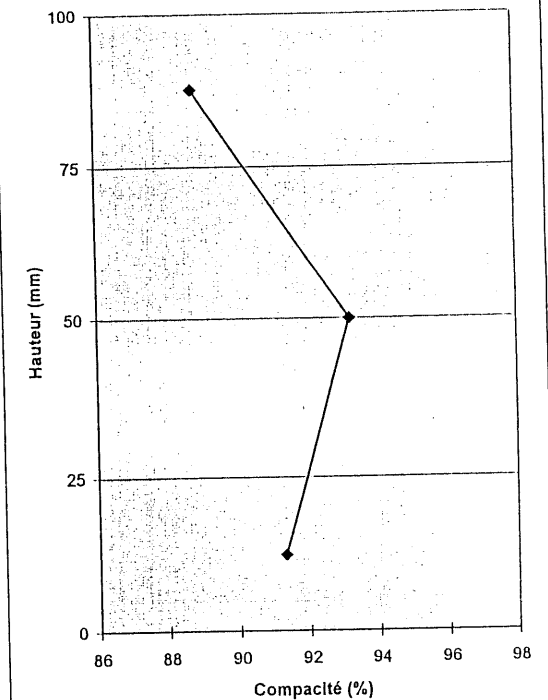
Compacité bas (25 mm)

Position	D brute	D max	Comp
1	2,325	2,561	90,8
2	2,335	2,561	91,2
3	2,351	2,561	91,8
Moyenne	2,337	2,561	91,3

Distribution de la compacité en largeur



Distribution de la compacité en hauteur



Compact

Compacité plaque

fort	92,9%
faible	88,3%

Comparaison des compacités entre le mode de compactage fort et le mode de compactage faible
Enrobé de type EB-10S contrat 96-945

Compacité globale (100 mm)

Type	Position	D brute	D max	Comp
fort	1	2,368	2,530	93,6
	2	2,377	2,530	94,0
	3	2,377	2,530	94,0
faible	1	2,324	2,530	91,9
	2	2,325	2,530	91,9
	3	2,340	2,530	92,5

Compacité centrale (50 mm)

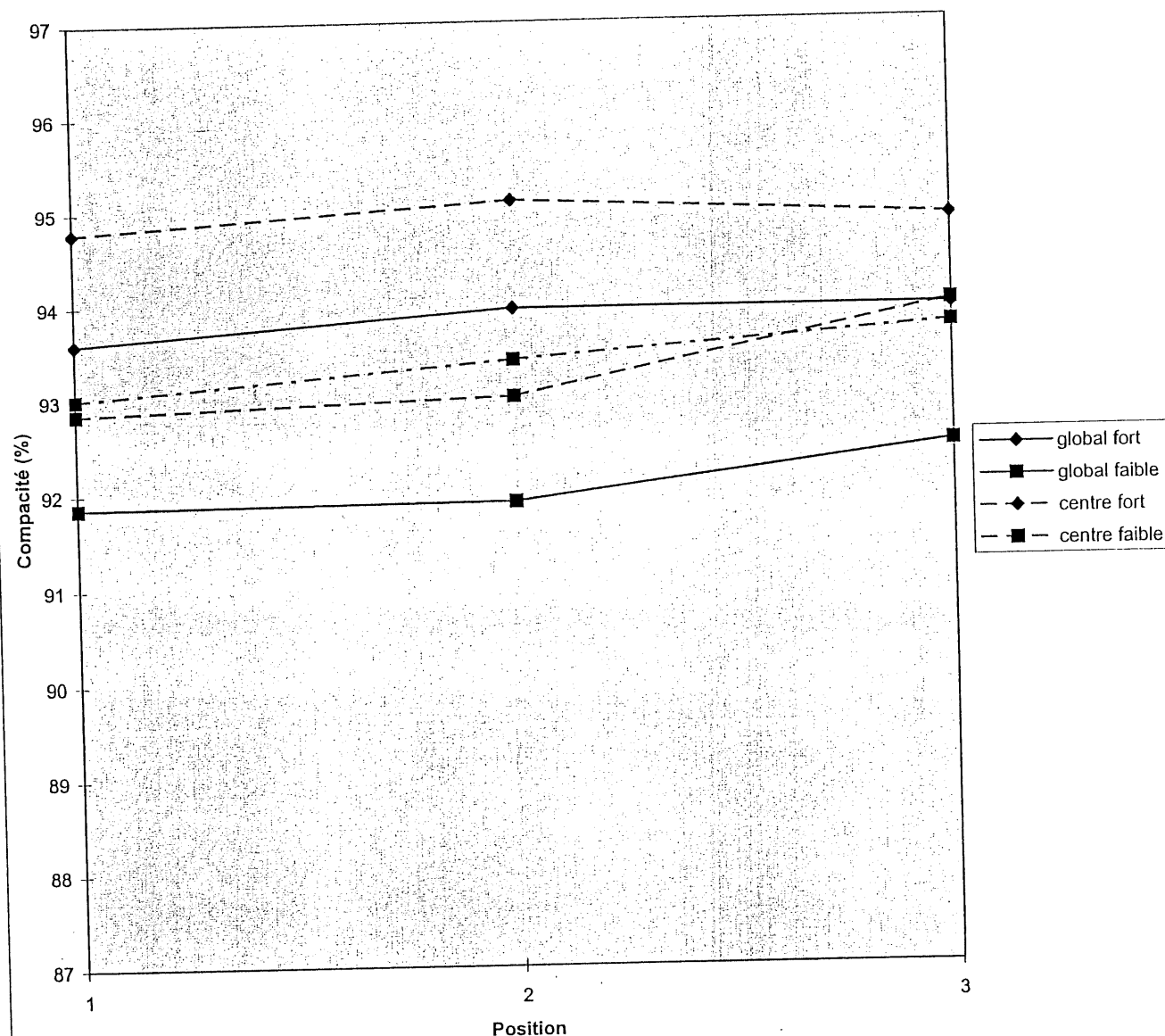
Type	Position	D brute	D max	Comp
fort	1	2,398	2,530	94,8
	2	2,406	2,530	95,1
	3	2,401	2,530	94,9
faible	1	2,349	2,530	92,8
	2	2,353	2,530	93,0
	3	2,378	2,530	94,0

Compacité centrale haut (25 mm)

Type	Position	D brute	D max	Comp
fort	1	2,341	2,530	92,5
	2	2,351	2,530	92,9
	3	2,354	2,530	93,0
faible	1	2,323	2,530	91,8
	2	2,318	2,530	91,6
	3	2,356	2,530	93,1

Compacité centrale bas (25 mm)

Type	Position	D brute	D max	Comp
fort	1	2,427	2,530	95,9
	2	2,443	2,530	96,6
	3	2,422	2,530	95,7
faible	1	2,353	2,530	93,0
	2	2,363	2,530	93,4
	3	2,372	2,530	93,8



ANNEXE III

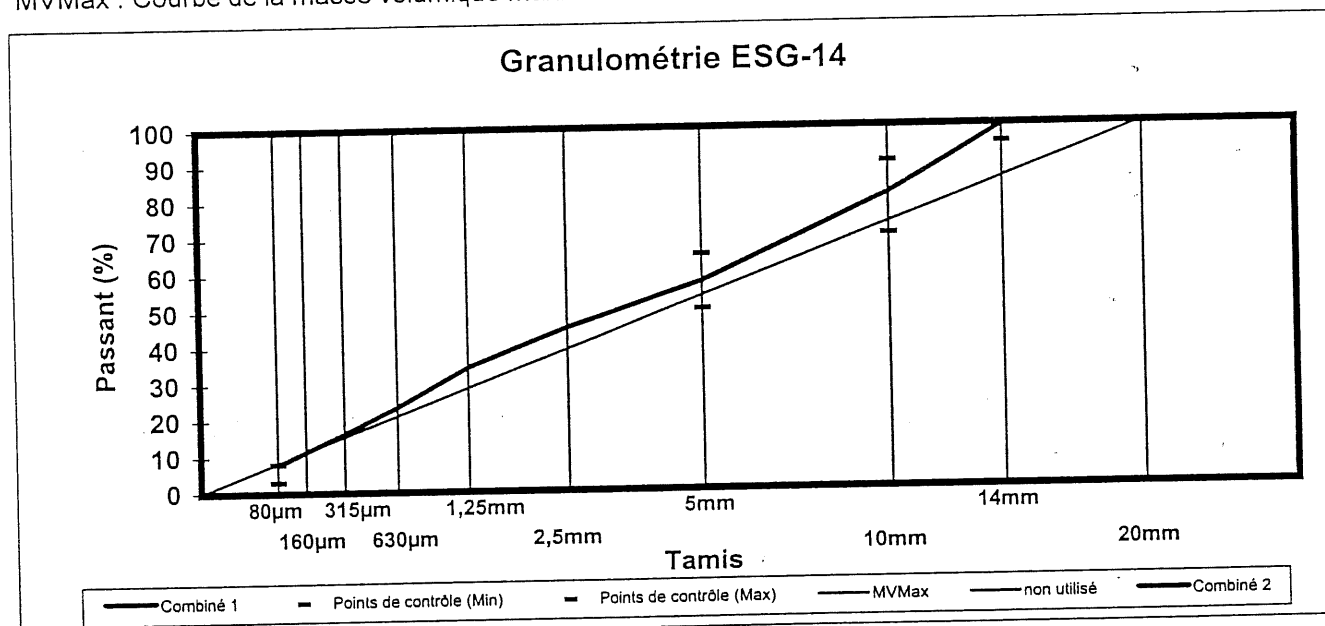
Formulation des enrobés de base ESG-14 et GB-20.



Analyse granulométrique

	Classes granulaires						Combinés		Points de contrôle		Zone de restriction	
	10-14mm	5-10 mm	2,5-5mm	0-2,5mm			1	2	Min	Max	Min	Max
Comb. 1	20,0%	25,0%	10,0%	45,0%			100,0%					
Comb. 2								0,0%	%	%	%	%
Tamis(mm)												
20	100	100	100	100			100	0	100	100		
14	98	100	100	100			100	0	95	100		
10	8	98	100	100			81	0	70	90		
5	0	10	100	100			58	0	50	65		
2,5	0	0	10	98			45	0			39,2	39,2
1,25	0	0	1	76			34	0			25,7	31,7
0,630	0	0	1	52			24	0			19,1	23,1
0,315	0	0	1	36			16	0			15,4	15,4
0,160	0	0	1	25			11	0				
0,080	0,0	0,0	0,7	17,1			7,8	0,0	3	8		

MVMax : Courbe de la masse volumique maximale



Remarque :

% Liant:

Copies à:

No: Laboratoire :

No: Projet :

Préparé par:

Approuvé par :

Date :



Service des matériaux d'infrastructures
2700, Einstein, Sainte-Foy (Québec) Canada G1P 3W8
Téléphone : (418) 644-0181 Télécopieur : (418) 646-6692





Détermination de la classe de performance du bitume

Producteur : Ultramar
Localisation : St-Romuald
Type de bitume : ordinaire
Classification SHRP : PG 58-28
Analysé par : Daniel Ferland 97-11-03
Approuvé par : Jean-Claude Moreux Ph.D., chim.
V-1037 # 191897

Valeur de t_g pour $G^*/\sin\delta=1.0\text{kPa}$	62.6°C
% de perte au R.T.F.O.T	0.331
Point éclair °C	358
Viscosité Brookfield cP 135°C	280
Viscosité Brookfield cP 165°C	100
Retour d'élasticité à 10°C %	12.5
Solubilité (%) à 25°C	100.00
Numéro de laboratoire	LH97126

Cisaillement dynamique - original						Cisaillement dynamique - R.T.F.O.T.					
Temp °C	Diam. du disque mm	% déformation	G^* kPa	Angle de phase	$G^*/\sin\delta$ kPa	Temp. °C	Diam. du disque mm	% déformation	G^* kPa	Angle de phase	$G^*/\sin\delta$ kPa
58	25 mm	12.03	1.84	86.4	1.84	5	25 mm	0.15	10580	11.39	53570
64	"	12.17	0.84	87.4	0.84	10	"	0.22	7455	20.37	21420
						15	"	0.35	4677	32.89	8613
						20	"	0.63	2570	46.46	3545
						58	"	9.99	4.90	82.6	4.94
						64	"	10.01	2.14	84.6	2.15

Cisaillement dynamique-PAV						Flexion de poutre (Bitume vieilli au RTFOT et PAV)					
Temp °C	Diam. du disque mm	% déformation	G^* kPa	Angle de phase	$G^*/\sin\delta$ kPa	Temp °C	Module S(60) MPa	m	Temp °C	Module S(60) MPa	m
5	8 mm	1.03	37980	31.64	19920	-18	281	.303	-18	278	.304
10	"	1.02	21660	35.93	12710	-24	530	.238	-24	520	.249
15	"	1.01	11700	40.5	7595						
20	"	1.00	5988	45.25	4253						
Température où $S(60)=300\text{MPa}$									-28.7°C		
Température où $m(60)=0.300$									-28.4°C		

Essais conformes aux normes: AASHTO MP1-93, AASHTO PP1-93, AASHTO PP6-93, AASHTO TP1-93, AASHTO TP5-93
AASHTO TP3-93, AASHTO TP48-94. LC 25-03, LC 25-05

Conforme ISO 9002 et CAN-P-4C

Service des matériaux de chaussées
Parc Technologique du Québec Métropolitain, 2700 rue Einstein, Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8
Tél.: (418) 644-0181 * Télécopieur (Fax): (418) 646-6692



Service des matériaux d'infrastructures
2700, Einstein, Sainte-Foy (Québec), G1P 3W8
Téléphone : (418) 644-0181 Télécopieur : (418) 646-6692





Détermination de la classe de performance du bitume

Producteur : Polybec
Localisation : Montréal
Type de bitume : styrelf 13 80/100
Classification SHRP : PG 64-28
Analysé par : Daniel Ferland 97-10-31
Approuvé par : Jean-Claude Moreux Ph.D., chim.
V-1037 # 191898

Valeur de t_g pour $G^*/\sin\delta=1.0\text{kPa}$	70.0°C
% de perte au R.T.F.O.T	0.208
Point éclair °C	292
Viscosité Brookfield cP 135°C	640
Viscosité Brookfield cP 165°C	180
Retour d'élasticité à 10°C %	71.25
Solubilité (%) à 25°C	100.00
Numéro de laboratoire	LH97127

Cisaillement dynamique - original						Cisaillement dynamique - R.T.F.O.T.					
Temp °C	Diam. du disque mm	% déformation	G^* kPa	Angle de phase	$G^*/\sin\delta$ kPa	Temp. °C	Diam. du disque mm	% déformation	G^* kPa	Angle de phase	$G^*/\sin\delta$ kPa
64	25 mm	12.15	1.69	73.5	1.77	5	25 mm	.21	7660	19.2	23320
70	"	11.90	0.96	75.0	0.99	10	"	.32	5112	28.8	10610
						15	"	.55	2947	40.2	4563
						20	"	1.01	1608	47.9	2197
						58	"	10.04	3.27	69.2	3.50
						64	"	10.09	1.89	71.1	2.00

Cisaillement dynamique-PAV						Flexion de poutre (Bitume vieilli au RTFOT et PAV)					
Temp °C	Diam. du disque mm	% déformation	G^* kPa	Angle de phase	$G^*/\sin\delta$ kPa	Temp °C	Module S(60) MPa	m	Temp °C	Module S(60) MPa	m
5	8 mm	1.02	23171	35.1	13330	-18	158	.343	-18	150	.343
10	"	1.01	12161	39.0	7943	-24	328	.286	-24	328	.286
15	"	1.00	6503	43.2	4448						
20	"	1.01	3181	47.2	2334						
						Température où $S(60)=300\text{Mpa}$				-33.3°C	
						Température où $m(60)=0.300$				-32.5°C	

Essais conformes aux normes: AASHTO MP1-93, AASHTO PP1-93, AASHTO PP6-93, AASHTO TP1-93, AASHTO TP5-93
AASHTO TP3-93, AASHTO TP48-94. LC 25-03, LC 25-05

Conforme ISO 9002 et CAN-P-4C

Service des matériaux de chaussées

Parc Technologique du Québec Métropolitain, 2700 rue Einstein, Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8
Tél. : (418) 644-0181 * Télécopieur (Fax): (418) 646-6692



Service des matériaux d'infrastructures
2700, Einstein, Sainte-Foy (Québec), G1P 3W8
Téléphone : (418) 644-0181 Télécopieur : (418) 646-6692





Echantillon Granulat concassé (14-10 mm)

N° de rapport AP-114-97-A

Provenance Ray-Cap

N° de sac, tube 03502

U.T. Mercator Zone Est Ouest

Référence

Municipalité St-Flavien

N° de contrat

Comté C.M. Lotbinière

N° de dossier

Rang, trou, chaîn.

N° de source

Usage proposé Étude bitumineux

Prélevé par Félix Doucet

Endroit

Soumis par Matériaux de chaussées 97-10-23

Granulométrie (% passant)

Essais divers

Tamis	Séparé	Combiné	Exigences	Nombre pétrographique	Coef. de polissage
				MgSO ₄ > 5mm	% MgSO ₄ < 5mm
				Densité brute > 5mm	2.790 Absorption en eau > 5mm
				Densité brute < 5mm	Absorption en eau < 5mm
112 µm				Masse tassée kg/m ³	Masse non tassée kg/m ³
20 µm				Particules plates	% Particules allongées
56 µm				Los Angeles ()	Micro Deval ()
40 µm				Module de finesse < 5mm	5.05 Module de finesse < 10mm
20 µm	100	100		Valeur au bleu ()	Essai à la soude
14 µm	98	98		Fragmentation	% Friabilité
10 µm	8	8		< 2 microns	Coefficient d'écoulement
5,00mm	100	0		Résultat densité apparente (BNQ 2560-067) = 2.901	
2,50mm					
1,25mm					
630 µm					
315 µm					
160 µm					
80 µm					
5 µm					

Remarques Voir verso no: 17 Pour Etude

Copies à

Matériaux de chaussées
Félix Doucet

Préparé par

Approuvé par

Date

Anne Laverdière, tech. D
M. Guy Tremblay ing. Sc.A.
97/11/



Echantillon

Granulat concassé (10-5 mm)

N° de rapport AP-114-97-B

Provenance Ray-Car	N° de sac, tube 85504
Zone Est Ouest	Référence
U.T. Mercator	N° de contrat
Municipalité St-Flavien	N° de dossier
Comté C.M. Lotbinière	N° de source
Rang, trou, chain...	Prélevé par Félix Doucet le
Usage proposé étude bitumineux	Soumis par Matériaux de chaussées le 97-10-23
Endroit	

Granulométrie (% passant)

Essais divers

Tamais	Séparé	Combiné	Exigences	Nombre pétrographique	Coef. de polissage
				MgSO4 > 5mm	% MgSO4 < 5mm
				Densité brute > 5mm	2.800 Absorption en eau > 5mm 1.57%
				Densité brute < 5mm	Absorption en eau < 5mm
112 mm				Masse tassée kg/m³	Masse non tassée kg/m³
80 mm				Particules plates	% Particules allongées
56 mm				Los Angeles ()	Micro Deval ()
40 mm				Module de finesse < 5mm	5.05 Module de finesse < 10mm
20 mm				Valeur au bleu ()	Essai à la soude
14 mm	100	100		Fragmentation	% Friabilité
10 mm	98	98		< 2 micromètres	Coefficient d'écoulement
5,00mm	100	10		Résultat densité apparente (BNQ 2560-067) = 2.929	
2,50mm					
1,25mm					
630 µm					
315 µm					
160 µm					
80 µm					
5 µm					

Remarques Voir verso no: 17 Pour Etude

Copies à

Matériaux de chaussées
Félix Doucet

Préparé par

Approuvé par

Date

A.L.

M. Guy Tremblay Ing. M.Sc.A.

97/11/4



Echantillon

Granulat concassé (5-2.5 mm)

N° de rapport

AP-114-97-D

Provenance	Ray-Car	N° de sac, tube	185602
U.T. Mercator	Zone Est Ouest	Référence	
Municipalité	St-Flavien	N° de contrat	
Comté	C.M. Lotbinière	N° de dossier	
Rang, trou, chaîn.		N° de source	
Usage proposé	étude bitumineux	Prélevé par	Félix Doucet le
Endroit		Soumis par	Matériaux de chaussées le 97-10-23

Granulométrie (% passant)				Essais divers			
Tamis	Séparé	Combiné	Exigences				
				Nombre pétrographique		Coef. de polissage	
				MgSO4 > 5mm		% MgSO4 < 5mm	
				Densité brute > 5mm		Absorption en eau > 5mm	
112 mm				Densité brute < 5mm	2.837	Absorption en eau < 5mm	1.30 %
80 mm				Masse tassée kg/m ³		Masse non tassée kg/m ³	
56 mm				Particules plates		% Particules allongées	
40 mm				Los Angeles ()		Micro Deval ()	
26 mm				Module de finesse < 5mm	4.87	Module de finesse < 10mm	
20 mm				Valeur au bleu ()		Essai à la soude	
14 mm				Fragmentation		% Friabilité	
10 mm				< 2 micromètres		Coefficient d'écoulement	
5,00mm	100	100		Résultat densité apparente (BNQ 2560-065) = 2.945			
2,50mm	10	10					
1,25mm	1	1					
630 µm	1	1					
315 µm	1	1					
160 µm	1	1					
80 µm	0.7	0.7					
5 µm							

Remarques

Voir verso no: 17 Pour Etude

Copies à

Matériaux de chaussées
Félix Doucet

Préparé par

A.L.

Approuvé par

M. Guy Tremblay Ing. H.Sc.A.

Date

97/11/4



Echantillon

Granulat concassé (2.5-0 mm)

N° de rapport

AP-114-97-C

Provenance

Ray-Car

N° de sac, tube 185602

Zone

Est

Ouest

Référence

U.T. Mercator

N° de contrat

Municipalité

St-Flavien

N° de dossier

Comté

C.M. Lotbinière

N° de source

Rang, trou, chaîn.

Prélevé par Félix Doucet

le

Usage proposé

étude bitumineux

Soumis par Matériaux de chaussées le 97-10-23

Endroit

Granulométrie (% passant)

Essais divers

Tamis	Séparé	Combiné	Exigences	Nombre pétrographique	Coeff. de polissage
				MgS04 > 5mm	% MgS04 < 5mm
				Densité brute > 5mm	Absorption en eau > 5mm
				Densité brute < 5mm	Absorption en eau < 5mm
112 mm				2.835	1.30%
80 mm					
56 mm					
40 mm					
28 mm					
20 mm					
14 mm					
10 mm					
5.00 mm	100	100			
2.50 mm	98	98			
1.25 mm	76	76			
630 µm	52	52			
315 µm	36	36			
160 µm	25	25			
80 µm	17.1	17.1			
5 µm					

Remarques

Voir verso no: 17 Pour Etude

Copies à

Matériaux de chaussées
Félix Doucet

Préparé par

Anne Laverdière, tech.

Approuvé par

M. Guy Tremblay Ing. M.Sc.A.

Date

97/11/8

Gouvernement du Québec
Ministère des Transports
Direction Lab. des chaussées

Détermination de la densité maximale
(Méthode pycnométrique)

NORME: NQ 2300-045 (87-12-15)

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
97-1163		

Echantillons no:			
Numéro de la fiole	D	N	H
Masse du mélange A	1057.1	980.7	1081.5
Masse (fiole + plaque + mélange + eau) B	6584.5	6628.3	6779.8
Température de l'eau (T°C)	24.2	24.3	23.9
Masse (fiole + plaque + eau) <<note 1>> C	5928.9	6081.2	6106.8
Facteur de correction <<note 2>> D	1.000202	1.000177	1.000276
Densité maximale E	2.633	2.625	2.624
Densité maximale moyenne		2.627	

Note 1 : voir la charte de calibration de la fiole (volume "Calibration" du manuel qualité)
Note 2 : Voir le tableau 1 à la page 13 de la norme NQ 2300-045 (87/12/15)

Calcul de la densité maximale (E)

Notes

$$E = \frac{A}{A + C - B} \times D$$

Équipements	
Balance no: 000011	Thermomètre no: 898118
Agitateur no: 003467	Pompe à vide no: 000683
Manomètre no: 000071	Autres no:

Point de vérification (PV)		
Ecart maximal admissible répétabilité (r)		
$r \leq 0,011$	C	NC

Réduction d'échantillon	
Inquartation	
Diviseur d'échantillon	

Échantillon préparé par:	<i>Ch. Kest.</i>
Essai effectué par:	<i>Ch. Kest.</i>
Date de l'essai:	97/12/19

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 643-3178 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

C:\SOFORM045.WK4 (Janvier 1996)

TROXLER 4140 Gyrotory Compactor

p.1

Sample ID: 97-1163

Time: 10:52

Date: 1/07/98

Serial Number: 106
Pressure: 600. KPa

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	152.6	145.3	142.9	140.8	139.4	138.3	137.2	136.3	135.5	133.3
10	134.2	133.7	133.2	132.8	132.3	132.0	131.6	131.2	130.9	130.6
20	130.3	130.1	129.8	129.6	129.4	129.2	129.0	128.8	128.6	128.4
30	128.2	128.0	127.9	127.7	127.6	127.5	127.3	127.2	127.0	126.9
40	126.8	126.7	126.6	126.4	126.3	126.2	126.1	126.0	125.9	125.8
50	125.7	125.6	125.5	125.4	125.4	125.3	125.2	125.1	125.0	125.0
60	124.9	124.8	124.7	124.6	124.6	124.5	124.4	124.4	124.3	124.2
70	124.2	124.1	124.1	124.0	123.9	123.9	123.8	123.8	123.7	123.6
80	123.6	123.5	123.5	123.4	123.4	123.3	123.3	123.2	123.2	123.1
90	123.1	123.0	123.0	123.0	122.9	122.9	122.8	122.8	122.7	122.7
100	122.7	122.6	122.6	122.3	122.5	122.5	122.4	122.4	122.3	122.3
110	122.3	122.2	122.2	122.2	122.1	122.1	122.1	122.0	122.0	122.0
120	121.9	121.9	121.9	121.8	121.8	121.8	121.8	121.7	121.7	121.7
130	121.6	121.6	121.6	121.5	121.5	121.5	121.5	121.4	121.4	121.4
140	121.4	121.3	121.3	121.3	121.3	121.2	121.2	121.2	121.2	121.1
150	121.1	121.1	121.1	121.0	121.0	121.0	121.0	120.9	120.9	120.9
160	120.9	120.9	120.8	120.8	120.8	120.8	120.7	120.7	120.7	120.7
170	120.7	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6	120.5	120.5	120.5	120.5
180	120.5	120.5	120.4	120.4	120.4	120.4	120.4	120.3	120.3	120.3
190	120.3	120.3	120.3	120.2	120.2	120.2	120.2	120.2	120.2	120.1
200	120.1									

10 14.3%

80 7.0%

100 6.3%

200 4.2%

5.00% de bitume

TROXLER 4140 Gyrotory Compactor

p.1

Sample ID: 97-1163

Time: 14:58

Date: 1/07/98

Serial Number: 106
Pressure: 600. KPa

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	148.2	141.3	139.2	137.2	135.8	134.5	133.5	132.6	131.9	131.2
10	130.6	130.1	129.5	129.1	128.7	128.3	127.9	127.6	127.3	127.0
20	126.7	126.4	126.2	125.9	125.7	125.5	125.3	125.1	124.9	124.7
30	124.5	124.4	124.2	124.1	123.9	123.8	123.6	123.5	123.4	123.2
40	123.1	123.0	122.9	122.8	122.7	122.6	122.5	122.4	122.3	122.2
50	122.1	122.0	121.9	121.8	121.8	121.7	121.6	121.5	121.5	121.4
60	121.3	121.2	121.2	121.1	121.1	121.0	120.9	120.9	120.8	120.8
70	120.7	120.7	120.6	120.5	120.5	120.4	120.4	120.3	120.3	120.3
80	120.2	120.2	120.1	120.1	120.0	120.0	120.0	119.9	119.9	119.8
90	119.8	119.8	119.7	119.7	119.7	119.6	119.6	119.6	119.5	119.5
100	119.5	119.4	119.4	119.4	119.4	119.3	119.3	119.3	119.3	119.2
110	119.2	119.2	119.1	119.1	119.1	119.1	119.0	119.0	119.0	119.0
120	118.9	118.9	118.9	118.9	118.9	118.8	118.8	118.8	118.8	118.8
130	118.7	118.7	118.7	118.7	118.7	118.6	118.6	118.6	118.6	118.6
140	118.5	118.5	118.5	118.5	118.5	118.4	118.4	118.4	118.4	118.4
150	118.4	118.3	118.3	118.3	118.3	118.3	118.3	118.3	118.2	118.2
160	118.2	118.2	118.2	118.2	118.1	118.1	118.1	118.1	118.1	118.1
170	118.1	118.0	118.0	118.0	118.0	118.0	118.0	118.0	118.0	117.9
180	117.9	117.9	117.9	117.9	117.9	117.9	117.9	117.8	117.8	117.8
190	117.8	117.8	117.8	117.8	117.8	117.8	117.7	117.7	117.7	117.7
200	117.7									

MOYENNE de 2

10 - 11.99%
20 - 9.23%
30 = 4.4%
40 = 3.8%
50 = 3.3%
60 = 2.9%
70 = 2.3%

10 - 12.8
20 - 4.4
30 - 3.8
40 - 2.8
50 - 2.2 %

5.0 de bitume

Q. tel

TROXLER 4140 Gyratory Compactor

p.1

Sample ID: _____

Time: 15:08

Date: 1/07/98

Serial Number: 106
Pressure: 600. KPa

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	149.2	142.3	139.8	138.0	136.6	135.1	134.1	133.2	132.4	131.7
10	131.1	130.5	130.1	129.6	129.1	128.8	128.3	128.0	127.7	127.4
20	127.1	126.8	126.6	126.3	126.1	125.9	125.6	125.4	125.2	125.1
30	124.9	124.7	124.5	124.4	124.2	124.1	123.9	123.8	123.6	123.5
40	123.4	123.3	123.2	123.0	122.9	122.8	122.7	122.6	122.5	122.4
50	122.3	122.2	122.1	122.0	121.9	121.9	121.8	121.7	121.6	121.5
60	121.3	121.4	121.3	121.3	121.2	121.1	121.1	121.0	120.9	120.9
70	120.8	120.8	120.7	120.7	120.6	120.5	120.5	120.4	120.4	120.3
80	120.3	120.2	120.2	120.2	120.1	120.1	120.0	120.0	119.9	119.9
90	119.8	119.8	119.8	119.7	119.7	119.7	119.6	119.6	119.5	119.5
100	119.5	119.4	119.4	119.4	119.3	119.3	119.3	119.2	119.2	119.2
110	119.1	119.1	119.1	119.1	119.0	119.0	119.0	118.9	118.9	118.9
120	118.9	118.8	118.8	118.8	118.7	118.7	118.7	118.7	118.6	118.6
130	118.6	118.6	118.5	118.5	118.5	118.5	118.4	118.4	118.4	118.4
140	118.4	118.3	118.3	118.3	118.3	118.3	118.2	118.2	118.2	118.2
150	118.1	118.1	118.1	118.1	118.1	118.1	118.0	118.0	118.0	118.0
160	118.0	118.0	117.9	117.9	117.9	117.9	117.9	117.9	117.8	117.8
170	117.8	117.8	117.8	117.8	117.7	117.7	117.7	117.7	117.7	117.7
180	117.7	117.6	117.6	117.6	117.6	117.6	117.6	117.6	117.6	117.5
190	117.5	117.5	117.5	117.5	117.5	117.5	117.4	117.4	117.4	117.4
200	117.4									

10 = 12.3%
20 = 9.5%
80 = 4.4%
100 = 3.8%
120 = 3.3%
150 = 2.6%
200 = 2.1%

Préparation des mélanges hydrocarbonés
Partie 2 : Compactage des plaques
(Norme française)

NORME: NF P 98-250-2 (Novembre 1991)

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
97-1163 (3)		

Boîte de mélange	Formulation
Enrobé :	Enrobé : ESG-14
T° chauffage (°C) :	Masse(g) granulat : 22000 T(°C) = 180
% compaction (prévu) :	Type de bitume : PG664-34
Densité maximale (1) :	% bitume : S.O.
Note: _____	Masse(g) du bitume : 1158g T(°C) = 165
_____	Masse(g) (autre) :
_____	% compaction (prévu) : 95
	Densité maximale (1): 2627

Masse à prélever (avant compaction)				
Hauteur de la plaque	V (moule) cm ³	Densité max.	% comp. prévu	Masse à prélever (g)
	V	Dmax	%C	M = V * Dmax * %C/100
50mm	4500			
100mm	9000	2627	95	22461

% Compaction réel (%Cr) (après fabrication de la plaque)				
Numero de la plaque	Rejet (g)	Masse réelle (g)	Masse (g) à 0%V	%Compaction réel
	R	Mr = M - R	M0 = V * Dmax	%Cr = (Mr / M0) * 100

(1) : Selon la norme NQ 2300-045 (87/12/15)

Point de vérification (PV)	
	Cochez
Ligne 7 (après exécution) vérifier le total cumulé	4-3-4 ✓✓✓
Ligne 11 (après exécution) vérifier le total cumulé	26-14-26 ✓✓✓
Ligne 15 (après exécution) vérifier le total cumulé	34-24-34 ✓✓✓

Equipements	
Balance no: 002187	Etuve no: 000247
Mélangeur no: 001846	Etuve no: 002331
Compacteur no: 002540	Autres no:

Essai effectué par:	Ch. Lelièvre
Date de l'essai:	98/01/08

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692



Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports
Direction Lab. des chaussées

Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés
Partie 1 : Essai d'orniérage
(Compilation des ornières)

NORME: NF P 98-253-1 (JUILLET 1991)

No. lab.	Type d'enrobé	Moule no.	Hauteur(mm)	Essai(T°C)	No. Porte	Code(voir verso)
94-11635	ESG-14	4D	100	60	A	

Cycles	1	2	3	4	5
1000 à froid	4378	4876	4301	4133	3972
100					
300					
1000					
3000					
10000					
17000					
	5444	5684	5804	5721	5338
Cycles	6	7	8	9	10
1000 à froid	4341	4342	4321	4244	4055
100					
300					
1000					
3000					
10000					
17000					
	5587	5885	5977	5951	5409
Cycles	11	12	13	14	15
1000 à froid	4315	4340	4300	4200	4070
100					
300					
1000					
3000					
10000					
17000					
	5773	5833	5805	5735	5309

Emplacement des lectures

Gauche

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15

Droite

Devant du moule (près de la porte)

Equipements	
Omiéreur vert no: 002541	
Omiéreur rouge no: 004906	✓
Pied à coulisse no: 002073	
Guide à lecture no: 100	✓
Guide à lecture no: 50	

Plaque préparée par:

Essai effectué par:

Date de l'essai:

JP F 35
JP E 25

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692



Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports

Direction Lab. des chaussées

Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés
Partie 1 : Essai d'orniérage
(Points de contrôle et notes)

NORME: NF P 98-253-1 (JUILLET 1991)

Points de contrôle					Conformité		
					OUI	NON	
Pression des pneus à froid (6 bars)					✓		
Vérification de la température d'essai					✓		
Réglage des deux compteurs					✓		
Orniéreur vert seulement							
Plaque de 50mm : désactiver l'interrupteur du haut							
Plaque de 100mm : activer l'interrupteur du haut							
Vérification de l'ornière en mode automatique Comparer l'ornière inscrite sur la sortie d'impression et celle obtenue par la prise initiale et finale manuellement (En mode automatique seulement) Si l'écart est supérieur à 2mm prendre l'ornière MAN, sinon le résultat de l'ornière AUT est utilisé.							
Moule no:	Lectures moyennes		Ornières		Écart MAN - AUT E	Ornière conservée	
	Initiale I	Finale F	(F - I) MAN	Programme AUT		E > 2mm Manuel*	E ≤ 2mm Automat.
4D	42.13	56.54	14.41	15.00	0.59		15.00

* : La courbe est ajustée afin de respecter le comportement obtenu en mode automatique.

Description des codes

A Saignement de la plaque après 1000 cycles à froid
 B Arrachement après 1000 cycles à froid
 C Saignement de la plaque et arrachement après 1000 cycles à froid
 D Saignement de la plaque à la fin de l'essai
 E Arrachement à la fin de l'essai
 F Saignement de la plaque et arrachement à la fin de l'essai
 G Voir la note ci-bas

Note: DEBUT DE SAIGNEMENT à la fin de l'essai

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés
 Partie 1 : Essai d'orniérage
 (Compilation des ornières)

NORME: NF P 98-253-1 (JUILLET 1991)

No. lab	Type d'enrobé	Moule no:	Hauteur (mm)	Essai (T°C)	No. Porte	Code (voir verso)
97-1163 S	ESG-14	W	100	60	13	6

Cycles	1	2	3	4	5
1000 à froid	3674	3875	3855	3702	3811
100					
300					
1000					
3000					
10000					
17000					
	5157	5442	5369	5280	4866
Cycles	6	7	8	9	10
1000 à froid	3828	3964	4044	4010	3988
100					
300					
1000					
3000					
10000					
17000					
	5228	5612	5567	5407	5053
Cycles	11	12	13	14	15
1000 à froid	3919	4110	4078	4058	4110
100					
300					
1000					
3000					
10000					
17000					
	5115	5518	5327	5370	5018

Emplacement des lectures

Gauche

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15

Droite

Devant du moule (près de la porte)

Equipements	
Orniéreur vert no: 002541	
Orniéreur rouge no: 004906	✓
Pied à coulisse no: 002073	
Guide à lecture no: 100	✓
Guide à lecture no: 50	

Plaque préparée par:	C. & J.S.
Essai effectué par:	C. & J.S.
Date de l'essai:	28/01/12

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692



Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports

Direction Lab. des chaussées

Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés
Partie 1 : Essai d'orniérage
(Points de contrôle et notes)

NORME: NF P 98-253-1 (JUILLET 1991)

Points de contrôle					Conformité		
					Oui	Non	
Pression des pneus à froid (6 bars)					✓		
Vérification de la température d'essai					✓		
Réglage des deux compteurs					✓		
Orniérage vert seulement							
Plaque de 50mm : désactiver l'interrupteur du haut							
Plaque de 100mm : activer l'interrupteur du haut							
Vérification de l'ornière en mode automatique Comparer l'ornière inscrite sur la sortie d'impression et celle obtenue par la prise initiale et finale manuellement (En mode automatique seulement) Si l'écart est supérieur à 2mm prendre l'ornière MAN sinon le résultat de l'ornière AUT est utilisé.							
Moule no:	Lectures moyennes		Ornières		Écart MAN - AUT E	Ornière conservée	
	Initiale I	Finale F	(F - I) MAN	Programme AUT		E > 2mm Manuel*	E ≤ 2mm Automat.
W	39.57	52.89	13.37	14.50	1.12		14.50

* : La courbe est ajustée afin de respecter le comportement obtenu en mode automatique.

Description des codes

A Saignement de la plaque après 1000 cycles à froid
 B Arrachement après 1000 cycles à froid
 C Saignement de la plaque et arrachement après 1000 cycles à froid
 D Saignement de la plaque à la fin de l'essai
 E Arrachement à la fin de l'essai
 F Saignement de la plaque et arrachement à la fin de l'essai
 G Voir la note ci-bas

Note: DEBUT DE SAIGNEMENT à la fin de l'essai

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

Préparation des mélanges hydrocarbonés
Partie 2 : Compactage des plaques
(Norme française)

NORME: NF P 98-250-2 (Novembre 1991)

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
97-1163		

Boîte de mélange	Formulation
Enrobé :	Enrobé : <u>ESG-14</u>
T° chauffage (°C) :	Masse(g) granulat : <u>22000</u> T(°C) = <u>165</u>
% compaction (prévu) :	Type de bitume : <u>PG 58-28</u>
Densité maximale (1) :	% bitume : <u>5.0%</u>
Note: _____	Masse(g) du bitume : <u>1158</u> T(°C) = <u>150</u>
_____	Masse(g) (autre) :
_____	% compaction (prévu) : <u>95</u>
	Densité maximale (1) : <u>2.627</u>

Masse à prélever (avant compaction)

Hauteur de la plaque	V (moule) cm ³	Densité max.	% comp. prévu	Masse à prélever (g)
	V	Dmax	%C	M = V * Dmax * %C/100
50mm	4500			
100mm	9000	2.627	0.95	22461

% Compaction réel (%Cr) (après fabrication de la plaque)

Numero de la plaque	Rejet (g)	Masse réelle (g)	Masse (g) à 0%V	%Compaction réel
	R	Mr = M - R	M0 = V * Dmax	%Cr = (Mr / M0) * 100

(1) : Selon la norme NQ 2300-045 (87/12/15)

Point de vérification (PV)

	Cochez
Ligne 7 (après exécution) vérifier le total cumulé	4-3-4 ✓✓✓
Ligne 11 (après exécution) vérifier le total cumulé	26-14-26 ✓✓✓
Ligne 15 (après exécution) vérifier le total cumulé	34-24-34 ✓✓✓

Equipements

Balance no: 002187	Étude no: 000247
Mélangeur no: 001846	Étude no: 002331
Compacteur no: 002540	Autres no:

Essai effectué par:

Date de l'essai:

J. S. Leclerc
J. S. Leclerc

98/01/08

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692



Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports
Direction Lab. des chaussées

Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés
Partie 1 : Essai d'orniérage
(Compilation des ornières)

NORME: NF P 98-253-1 (JUILLET 1991)

No. lab.	Type d'enrobé	Moule no.	Hauteur (mm)	Essai (T°C)	No. Porte	Code (voir verso)
94-1163 C	ESG-14	48	100	60°	A	4

Cycles	1	2	3	4	5
1000 à froid	4154	4212	4310	4232	4110
100					
300					
1000					
3000					
10000					
17000					
	5170	5334	5192	5132	4482
Cycles	6	7	8	9	10
1000 à froid	4158	4154	4173	4165	4092
100					
300					
1000					
3000					
10000					
17000					
	5204	5762	5345	5270	4955
Cycles	11	12	13	14	15
1000 à froid	4109	4137	4111	4220	4125
100					
300					
1000					
3000					
10000					
17000					
	5307	5307	5345	5245	2028

Emplacement des lectures

Gauche

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15

Droite

Devant du moule (près de la porte)

Equipements	
Omiéreur vert no: 002541	<input checked="" type="checkbox"/>
Omiéreur rouge no: 004906	<input type="checkbox"/>
Pied à coulisse no: 002073	<input type="checkbox"/>
Guide à lecture no: 100	<input checked="" type="checkbox"/>
Guide à lecture no: 50	<input type="checkbox"/>

Plaque préparée par:	G. & J.S.
Essai effectué par:	G.S.
Date de l'essai:	98/01/12

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692



Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports

Direction Lab. des chaussées

Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés
Partie 1 : Essai d'orniérage
(Points de contrôle et notes)

NORME: NF P 98-253-1 (JUILLET 1991)

Points de contrôle					Conformité		
					OUI	NON	
Pression des pneus à froid (6 bars)					✓		
Vérification de la température d'essai					✓		
Réglage des deux compteurs					✓		
Orniéreur vert seulement							
Plaque de 50mm : désactiver l'interrupteur du haut							
Plaque de 100mm : activer l'interrupteur du haut					✓		
Vérification de l'ornière en mode automatique Comparer l'ornière inscrite sur la sortie d'impression et celle obtenue par la prise initiale et finale manuellement (En mode automatique seulement) Si l'écart est supérieur à 2mm prendre l'ornière MAN sinon le résultat de l'ornière AUT est utilisé.							
Moule no:	Lectures moyennes		Ornières		Écart MAN - AUT E	Ornière conservée	
	Initiale I	Finale F	(F - I) MAN	Programme AUT		E > 2mm Manuel*	E ≤ 2mm Automat.
48	41,64	51,74	10.1	8.3	1.8		8.3

* : La courbe est ajustée afin de respecter le comportement obtenu en mode automatique.

Description des codes

- A Saignement de la plaque après 1000 cycles à froid
- B Arrachement après 1000 cycles à froid
- C Saignement de la plaque et arrachement après 1000 cycles à froid
- D Saignement de la plaque à la fin de l'essai
- E Arrachement à la fin de l'essai
- F Saignement de la plaque et arrachement à la fin de l'essai
- G Voir la note ci-bas

Note:

Debit de saignement a la fin de l'essai

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692



Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports
Direction Lab. des chaussées

Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés
Partie 1 : Essai d'orniérage
(Compilation des ornières)

NORME: NF P 98-253-1 (JUILLET 1991)

No: lab.	Type d'enrobé	Moule no:	Hauteur (mm)	Essai (T°C)	No: Porte	Code (voir verso)
97-1163C	ESG-14	A	100	60	13	4
Cycles	1	2	3	4	5	
1000 à froid	4068	3953	3978	4042	4153	
100						
300						
1000						
3000						
10000						
17000						
	5093	5386	5710	5910	5504	
Cycles	6	7	8	9	10	
1000 à froid	3964	3999	4055	4056	4110	
100						
300						
1000						
3000						
10000						
17000						
	4477	5540	5862	6012	5600	
Cycles	11	12	13	14	15	
1000 à froid	3891	4008	3975	4019	4095	
100						
300						
1000						
3000						
10000						
17000						
	5010	5720	5782	5943	5465	

Emplacement des lectures

Gauche

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15

Droite

Devant du moule (près de la porte)

Equipements	
Orniéreur vert no: 002541	<input checked="" type="checkbox"/>
Orniéreur rouge no: 004906	<input type="checkbox"/>
Pied à coulisse no: 002073	<input type="checkbox"/>
Guide à lecture no: 100	<input checked="" type="checkbox"/>
Guide à lecture no: 50	<input type="checkbox"/>

Plaque préparée par:

Essai effectué par:

Date de l'essai:

G. S. JS
G. S. JS
98/01/12

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés
Partie 1 : Essai d'orniérage
(Points de contrôle et notes)

NORME: NF P 98-253-1 (JUILLET 1991)

Points de contrôle					Conformité		
					OUI	NON	
Pression des pneus à froid (6 bars)					✓		
Vérification de la température d'essai					✓		
Réglage des deux compteurs					✓		
Orniéreur vert seulement							
Plaque de 50mm : désactiver l'interrupteur du haut							
Plaque de 100mm : activer l'interrupteur du haut					✓		
Vérification de l'ornière en mode automatique Comparer l'ornière inscrite sur la sortie d'impression et celle obtenue par la prise initiale et finale manuellement (En mode automatique seulement) Si l'écart est supérieur à 2mm prendre l'ornière MAN selon le résultat de l'ornière AUT est utilisé.							
Moule no:	Lectures moyennes		Ornières		Écart MAN - AUT E	Ornière conservée	
	Initiale I	Finale F	(F - I) MAN	Programme AUT		E > 2mm Manuel*	E ≤ 2mm Automat.
A	40.27	35.48	15.21	15.4	0.19		15.4

* : La courbe est ajustée afin de respecter le comportement obtenu en mode automatique.

Description des codes

A Saignement de la plaque après 1000 cycles à froid
 B Arrachement après 1000 cycles à froid
 C Saignement de la plaque et arrachement après 1000 cycles à froid
 D Saignement de la plaque à la fin de l'essai
 E Arrachement à la fin de l'essai
 F Saignement de la plaque et arrachement à la fin de l'essai
 G Voir la note ci-bas

Note: DÉBUT DE SAIGNEMENT A la fin de l'essai

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

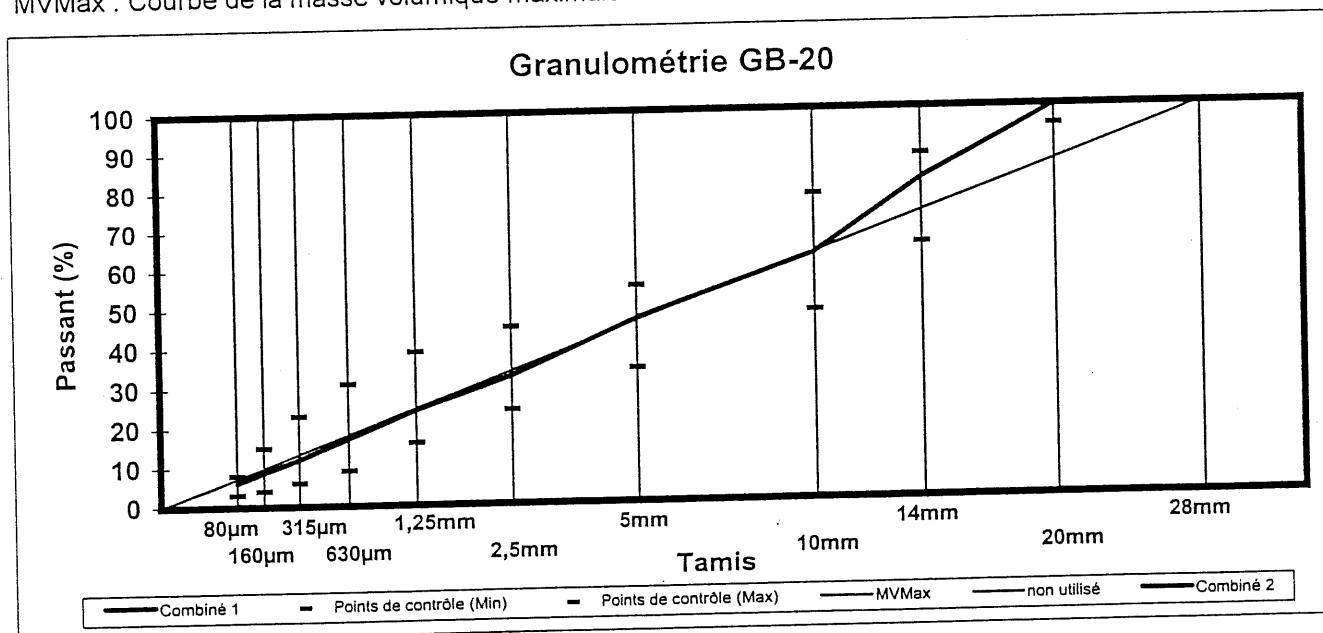
Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692



Analyse granulométrique

	Classes granulaires					Combinés		Points de contrôle		Zone de restriction	
	14-20mm	10-14 mm	5-10 mm	2,5-5mm	0-2,5mm	1		Min	Max	Min	Max
Comb. 1	20,0%	20,0%	15,0%	15,0%	30,0%	100,0%		%	%	%	%
Comb. 2							0,0%				
Tamis(mm)											
28	100	100	100	100	100	100	0	100	100		
20	99	100	100	100	100	100	0	95	100		
14	9	99	100	100	100	82	0	65	88		
10	0	14	99	100	100	63	0	48	78		
5	0	1	12	97	100	47	0	34	55		
2,5	0	1	1	16	99	32	0	24	45	39	39
1,25	0	1	1	1	79	24	0	16	39	26	32
0,630	0	1	1	1	55	17	0	9	31	19	23
0,315	0	1	1	1	38	12	0	6	23	16	16
0,160	0	1	1	1	27	9	0	4	15		
0,080	0,2	0,5	0,8	0,7	18,8	6,0	0,0	3	8		

MVMax : Courbe de la masse volumique maximale



Remarque :

% Liant:

Copies à:

No: Laboratoire :

No: Projet :

Préparé par:

Approuvé par :

Date :



Service des matériaux d'infrastructures
2700, Einstein, Sainte-Foy (Québec) Canada G1P 3W8
Téléphone : (418) 644-0181 Télécopieur : (418) 646-6692

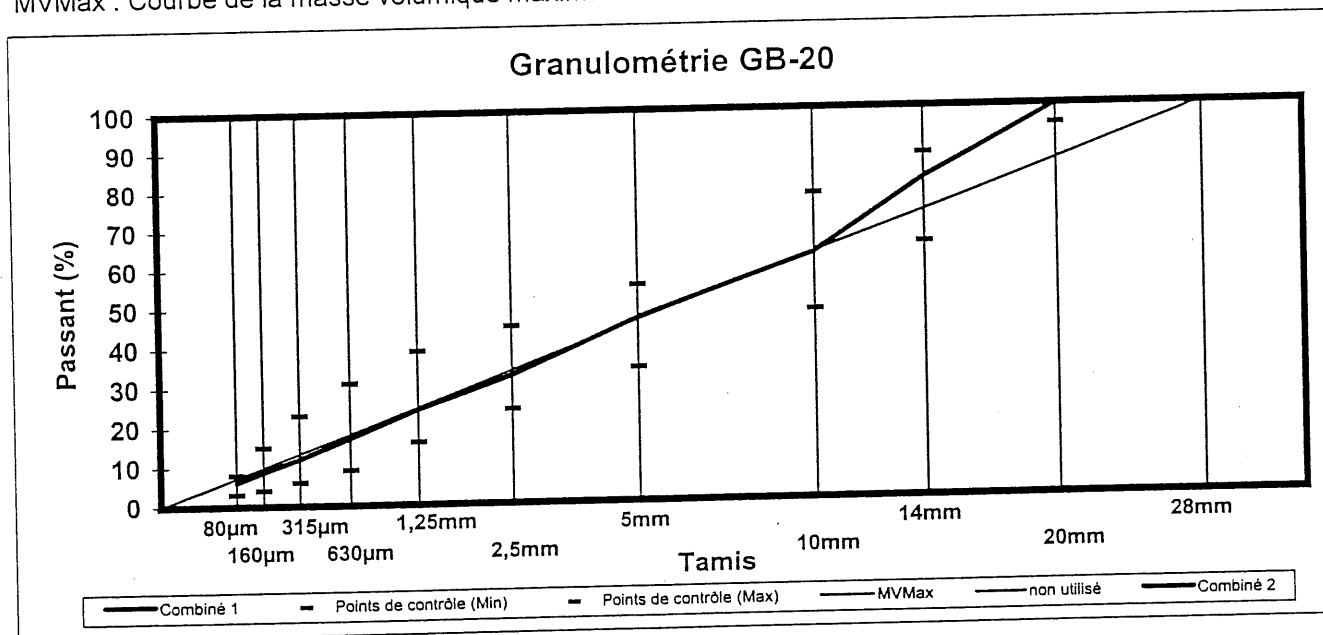




Analyse granulométrique

	Classes granulaires						Combinés		Points de contrôle		Zone de restriction	
	14-20mm	10-14 mm	5-10 mm	2,5-5mm	0-2,5mm		1		Min	Max	Min	Max
Comb. 1	20,0%	20,0%	15,0%	15,0%	30,0%		100,0%		%	%	%	%
Comb. 2							0,0%					
Tamis(mm)												
28	100	100	100	100	100		100	0	100	100		
20	99	100	100	100	100		100	0	95	100		
14	9	99	100	100	100		82	0	65	88		
10	0	14	99	100	100		63	0	48	78		
5	0	1	12	97	100		47	0	34	55		
2,5	0	1	1	16	99		32	0	24	45	39	39
1,25	0	1	1	1	79		24	0	16	39	26	32
0,630	0	1	1	1	55		17	0	9	31	19	23
0,315	0	1	1	1	38		12	0	6	23	16	16
0,160	0	1	1	1	27		9	0	4	15		
0,080	0,2	0,5	0,8	0,7	18,8		6,0	0,0	3	8		

MVMax : Courbe de la masse volumique maximale



Remarque :

% Liant:

Copies à:

No: Laboratoire :

No: Projet :

Préparé par:

Approuvé par :

Date :



Service des matériaux d'infrastructures
2700, Einstein, Sainte-Foy (Québec) Canada G1P 3W8
Téléphone : (418) 644-0181 Télécopieur : (418) 646-6692





Détermination de la classe de performance du bitume

Producteur : Polybec
Localisation : Montréal
Type de bitume : styrelf 13 80/100
Classification SHRP : PG 64-28
Analysé par : Daniel Ferland 97-10-31
Approuvé par : Jean-Claude Moreux Ph.D.,chim.
V-1037 # 191898

Valeur de t_g pour $G^*/\sin\delta=1.0\text{kPa}$	70.0°C
% de perte au R.T.F.O.T	0.208
Point éclair °C	292
Viscosité Brookfield cP 135°C	640
Viscosité Brookfield cP 165°C	180
Retour d'élasticité à 10°C %	71.25
Solubilité (%) à 25°C	100.00
Numéro de laboratoire	LH97127

Cisaillement dynamique - original						Cisaillement dynamique - R.T.F.O.T.					
Temp °C	Diam. du disque mm	% déformation	G* kPa	Angle de phase	G*/sinδ kPa	Temp. °C	Diam. du disque mm	% déformation	G* kPa	Angle de phase	G*/sinδ kPa
64	25 mm	12.15	1.69	73.5	1.77	5	25 mm	.21	7660	19.2	23320
70	"	11.90	0.96	75.0	0.99	10	"	.32	5112	28.8	10610
						15	"	.55	2947	40.2	4563
						20	"	1.01	1608	47.9	2197
						58	"	10.04	3.27	69.2	3.50
						64	"	10.09	1.89	71.1	2.00

Cisaillement dynamique-PAV						Flexion de poutre (Bitume vieilli au RTFOT et PAV)					
Temp °C	Diam. du disque mm	% déformation	G* kPa	Angle de phase	G*/sinδ kPa	Temp °C	Module S(60) MPa	m	Temp °C	Module S(60) MPa	m
5	8 mm	1.02	23171	35.1	13330	-18	158	.343	-18	150	.343
10	"	1.01	12161	39.0	7943	-24	328	.286	-24	328	.286
15	"	1.00	6503	43.2	4448						
20	"	1.01	3181	47.2	2334						
Température où S(60)=300Mpa									-33.3°C		
Température où m(60)=0.300									-32.5°C		

Essais conformes aux normes: AASHTO MP1-93, AASHTO PP1-93, AASHTO PP6-93, AASHTO TP1-93, AASHTO TP5-93
AASHTO TP3-93, AASHTO TP-48-94. LC 25-03, LC 25-05

Conforme ISO 9002 et CAN-P-4C

Service des matériaux de chaussées
Parc Technologique du Québec Métropolitain, 2700 rue Einstein, Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8
(418) 644-0181 * Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

Service des matériaux d'infrastructures
2700, Einstein, Sainte-Foy (Québec), G1P 3W8
Téléphone : (418) 644-0181 Télécopieur : (418) 646-6692





Détermination de la classe de performance du bitume

Producteur : Polybec
Localisation : Montréal
Type de bitume : styrelf 13 80/100
Classification SHRP : PG 64-28
Analysé par : Daniel Ferland 97-10-31
Approuvé par : Jean-Claude Moreux Ph.D., chim.
V-1037 # 191898

Valeur de t_g pour $G^*/\sin\delta=1.0\text{kPa}$	70.0°C
% de perte au R.T.F.O.T	0.208
Point éclair °C	292
Viscosité Brookfield cP 135°C	640
Viscosité Brookfield cP 165°C	180
Retour d'élasticité à 10°C %	71.25
Solubilité (%) à 25°C	100.00
Numéro de laboratoire	LH97127

Cisaillement dynamique - original						Cisaillement dynamique - R.T.F.O.T.					
Temp °C	Diam. du disque mm	% déformation	G^* kPa	Angle de phase	$G^*/\sin\delta$ kPa	Temp. °C	Diam. du disque mm	% déformation	G^* kPa	Angle de phase	$G^*/\sin\delta$ kPa
64	25 mm	12.15	1.69	73.5	1.77	5	25 mm	.21	7660	19.2	23320
70	"	11.90	0.96	75.0	0.99	10	"	.32	5112	28.8	10610
						15	"	.55	2947	40.2	4563
						20	"	1.01	1608	47.9	2197
						58	"	10.04	3.27	69.2	3.50
						64	"	10.09	1.89	71.1	2.00

Cisaillement dynamique-PAV						Flexion de poutre (Bitume vieilli au RTFOT et PAV)					
Temp °C	Diam. du disque mm	% déformation	G^* kPa	Angle de phase	$G^*/\sin\delta$ kPa	Temp °C	Module S(60) MPa	m	Temp °C	Module S(60) MPa	m
5	8 mm	1.02	23171	35.1	13330	-18	158	.343	-18	150	.343
10	"	1.01	12161	39.0	7943	-24	328	.286	-24	328	.286
15	"	1.00	6503	43.2	4448						
20	"	1.01	3181	47.2	2334						
						Température où $S(60)=300\text{Mpa}$				-33.3°C	
						Température où $m(60)=0.300$				-32.5°C	

Essais conformes aux normes: AASHTO MP1-93, AASHTO PP1-93, AASHTO PP6-93, AASHTO TP1-93, AASHTO TP5-93
AASHTO TP3-93, AASHTO TP-48-94. LC 25-03, LC 25-05

Conforme ISO 9002 et CAN-P-4C

Service des matériaux de chaussées
Parc Technologique du Québec Métropolitain, 2700 rue Einstein, Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8
(418) 644-0181 * Télécopieur (Fax): (418) 646-6692



Service des matériaux d'infrastructures
2700, Einstein, Sainte-Foy (Québec), G1P 3W8
Téléphone : (418) 644-0181 Télécopieur : (418) 646-6692



Echantillon

00

N° de rapport

AP-007-98-2

Provenance RAY Car

N° de sac, tube 55617

U.T. Mercator

Zone

Est

Ouest

Référence

Municipalité St-Flavien

N° de contrat 7261185

Comté Lotbinière

N° de dossier 97-1165

Rang, trou, chaîn.

N° de source Laboratoire

Usage proposé Enrobés bitumineux

Prélevé par Felix Douchet

le 98-03-02

Endroit

Soumis par Laboratoire chaussées

le 98-03-02

Granulométrie (% passant)

Essais divers

Tamais	Séparé	Combiné	Exigences				
				Nombre d'essais effectués		Coeff. de durabilité	
				ngs04 > 0.04		% ngs01 < 0.04	
				Densité brute > 0.94		Absorption en eau > 0.60	
				Densité brute < 0.94		Absorption en eau < 0.60	
112 µm				Masse tassée kg/m³		Masse non tassée kg/m³	
80 µm				Particules plates		% Particules allongées	
55 µm				Los Angeles		Fluxus Nevada	
15 µm				Module de finesse < 0.94	0.87	Module de finesse < 100µ	
20 µm				Valeur du bleu		Essai à la soude	
75 µm	100	100		Fragmentation		% Friabilité	
14 µm	99	99		< 2 micromètres		Coefficient d'écoulement	
10 µm	13	14					
5.00mm	100	1					
2.50mm	89	1					
1.05mm	84	1					
630 µm	83	1					
315 µm	80	1					
160 µm	79						
80 µm	76.5	0.5					
5 µm							

Remarques

voir verso n°1

Copies à

Laboratoire chaussées

Préparé par

Approuvé par

Date

Guy Tremblay ing. M.Sc.A.

Guy Tremblay ing. M.Sc.A.

98-03-02

ANALYSE DE SOLS ET GRANULATS
ISO 9002 et CAN-P-4C

Echantillon

60

N° de rapport

47-007-98-2

Provenance Ray Car

N° de sac, tube 55617

U.T. Mercator Zone Est Ouest

Référence

Municipalité St-Félicien

N° de contrat 7261185

Comté Lotbinière

N° de dossier 97-1185

Rang, trou, chaîn.

N° de source Laboratoire

Usage proposé Enrobés bitumineux

Prélevé par Felix Houclet le 98-03-02

Endroit

Soumis par Laboratoire chaussées le 98-03-02

Granulométrie (% passant)

Essais divers

Tamis	Séparé	Combiné	Exigences				
				Nombre de tamis		Coeff. de polydispersité	
				ngs04 > 0.075		% ngs04 < 0.075	
				Densité brute > 0.98		Absorption en eau > 0.04	
				Densité brute < 0.98		Absorption en eau < 0.04	
112 µm				Masse tassée kg/m³		Masse non tassée kg/m³	
60 µm				Particules plates		% Particules allongées	
56 µm				Los Angeles		Flux de sable	
10 µm				Module de finesse < 0.98	0.87	Module de finesse < 1.00	
20 µm				Valeur au bleu		Module de finesse	
14 µm	100	100		Fragmentation		% Friabilité	
10 µm	99	99		< 2 microns		Coefficient d'écoulement	
5.00mm	13	14					
2.50mm	100	1					
1.25mm	89	1					
630 µm	84	1					
315 µm	82	1					
160 µm	80	1					
80 µm	79						
40 µm	76.5	0.5					
20 µm							

Remarques

Voir verso no:

Copies à

Laboratoire chaussées

Préparé par

Approuvé par

Date

Guy Tremblay ing. M.Sc.A.

98-03-02

ANALYSE DE SOLS ET GRANULATS
ISO 9002 et CAN-P-4C

Echantillon GC	N° de rapport AP-007-98-4
-------------------	------------------------------

Provenance Ray Car	N° de sac, tube 185617
Zone U.T. Mercator	Référence
Municipalité St-Flavien	N° de contrat 7261185
Comté Lotbinière	N° de dossier 97-1185
Rang, trou, chaîn.	N° de source Laboratoire
Usage proposé Enrobés bitumineux	Prélevé par Felix Doucet le 98-03-02
Endroit	Soumis par Laboratoire chaussées le 98-03-02

Granulométrie (% passant)				Essais divers			
Tamis	Séparé	Combiné	Exigences				
				Nombre pétrographique		Coef. de bolivage	
				MqSD4 > 5mm		% MqSD4 < 5mm	
				Densité brute > 5mm		Absorption en eau > 5mm	
				Densité brute < 5mm		Absorption en eau < 5mm	
12 mm				Masse tassée kg/m³		Masse non tassée kg/m³	
30 mm				Particules plates		% Particules allongées	
56 mm				Los Angeles		Atterberg	
40 mm				Module de finesse < 5mm	4.81	Module de finesse < 10mm	
25 mm				Valeur au bleu		Essai à la coupe	
20 mm				Fragmentation		% Friabilité	
14 mm				< 2 micromètres		Coefficient d'écoulement	
10 mm		100					
5.00mm	100	97					
2.50mm	16	16					
1.25mm	1	1					
630 µm	1	1					
315 µm	1	1					
150 µm	1	1					
80 µm	0.8	0.7					
5 µm							

Remarques Voir verso no:

Copies à

Laboratoire chaussées

Préparé par Guylain Gosselin Tech.

Approuvé par H. Guy Tremblay Ing. M.Sc.A.

Date 98/ 3/ 3

ANALYSE DE SOLS ET GRANULATS
ISO 9002 et CAN-P-4C

Echantillon GC	N° de rapport AP-007-98-4
-------------------	------------------------------

Provenance Ray Car	N° de sac, tube 185617
Zone Est Ouest	Référence
U.T. Mercator	N° de contrat 7261185
Municipalité St-Flavien	N° de dossier 97-1185
Comté Lotbinière	N° de source Laboratoire
Rang, trou, chaîn.	Prélevé par Felix Doucet le 98-03-02
Usage proposé Enrobés bitumineux	Soumis par Laboratoire chaussées le 98-03-02
Endroit	

Granulométrie (% passant)				Essais divers			
Tamis	Séparé	Combiné	Exigences				
				Nombre pétrographique		Coeff. de doléance	
				MqSD4 > 5mm		% MqSD4 < 5mm	
				Densité brute > 2.65		Absorption en eau > 5mm	
				Densité brute < 5mm		Absorption en eau < 5mm	
112 µm				Masse tassée kg/m³		Masse non tassée kg/m³	
60 µm				Particules plates		% Particules allongées	
56 µm				Los Angeles ()		Winnipeg ()	
40 µm				Module de finesse < 5mm	4.81	Module de finesse < 10mm	
20 µm				Valeur au bleu ()		Essai à la soude	
14 µm				Fragmentation		% Friabilité	
10 µm		100		< 2 micronètres		Coefficient d'écoulement	
5.00mm	100	97					
2.50mm	16	16					
1.25mm	1	1					
630 µm	1	1					
315 µm	1	1					
150 µm	1	1					
80 µm	0.8	0.7					
5 µm							

Remarques Voir verso no:

Copies à

Laboratoire chaussées

Préparé par Guylain Gosselin Tech.

Approuvé par H. Guy Tremblay Ing. H.S.C.A.

Date 98/ 3/ 3

Gouvernement du Québec
Ministère des Transports
Direction Lab. des chaussées

Détermination de la densité maximale
(Méthode pycnométrique)

NORME: NQ 2300-045 (87-12-15)

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
97-1185	726 1185	let # 05 E3-20

Échantillons no:			
	H	N	D
Numéro de la fiole	H	N	D
Masse du mélange A	844.5	844.9	847.1
Masse (fiole + plaque + mélange + eau) B	6632.1	6607.8	6454.8
Température de l'eau (T°C)	24.2	24.6	24.2
Masse (fiole + plaque + eau) <<note 1>> C	6106.2	6080.6	5928.6
Facteur de correction <<note 2>> D	1.000202	1.000102	1.000282
Densité maximale E	2.646	2.658	2.640
Densité maximale moyenne		2.648	

Note 1 : voir la charte de calibration de la fiole (volume "Calibration" du manuel qualité)
Note 2 : Voir le tableau 1 à la page 13 de la norme NQ 2300-045 (87/12/15)

Calcul de la densité maximale (E)

$$E = \frac{A}{A + C - B} \times D$$

Notes

Note la densité maximale est
faible à 4.8% bitume

Equipements	
Balance no: 000011	Thermomètre no: 898118
Agitateur no: 003467	Pompe à vide no: 000683
Manomètre no: 000071	Autres no:

Point de vérification (PV)		
Ecart maximal admissible répétabilité (r)		
r ≤ 0,011	C	NC
	✓	

Réduction d'échantillon	
Inquartation	✓
Diviseur d'échantillon	

Échantillon préparé par:	CP
Essai effectué par:	CP
Date de l'essai:	22/03/06

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 643-3178 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

Gouvernement du Québec
Ministère des Transports
Direction Lab. des chaussées

Détermination de la densité maximale
(Méthode pycnométrique)

NORME: NQ 2300-045 (87-12-15)

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
97-1185	726 1185	let H 05 EB-20

Échantillons no:			
	#		
Numéro de la fiole	H	N	D
Masse du mélange A	844.5	844.9	847.1
Masse (fiole + plaque + mélange + eau) B	6632.1	6607.8	6454.8
Température de l'eau (T°C)	24.2	24.6	24.2
Masse (fiole + plaque + eau) <<note 1>> C	6106.2	6020.6	5928.6
Facteur de correction <<note 2>> D	1.000202	1.000102	1.000282
Densité maximale E	2.646	2.658	2.640
Densité maximale moyenne		2.648	

Note 1 : voir la charte de calibration de la fiole (volume "Calibration" du manuel qualité)
Note 2 : Voir le tableau 1 à la page 13 de la norme NQ 2300-045 (87/12/15)

Calcul de la densité maximale (E)

$$E = \frac{A}{A + C - B} \times D$$

Notes

Note la densité maximum est
faite à 4.8% bitume

Equipements	
Balance no: 000011	Thermomètre no: 898118
Agitateur no: 003467	Pompe à vide no: 000683
Manomètre no: 000071	Autres no:

Point de vérification (PV)		
Ecart maximal admissible répétabilité (r)		
r ≤ 0,011	C	NC
	✓	

Réduction d'échantillon	
Inquartation	✓
Diviseur d'échantillon	

Échantillon préparé par:	GP
Essai effectué par:	GP
Date de l'essai:	22/03/06

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 643-3178 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

C:\ISO\FORM045.WK4 (Janvier 1996)

TROXLER 4140 Gyrotory Compactor

0.1

Sample ID: 94-1125

Time: 11:27 am

Date: 3/08/98

Serial Number: 108
Pressure: 600. kPa

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	150.5	144.2	142.3	140.5	139.2	137.9	137.0	136.1	135.4	134.7
10	134.2	133.7	132.2	132.8	132.4	132.0	131.7	131.3	131.0	130.7
20	130.5	130.3	130.0	129.8	129.5	129.4	129.1	128.9	128.8	128.6
30	128.4	128.2	128.1	127.9	127.8	127.6	127.5	127.3	127.2	127.1
40	126.9	126.8	126.7	126.6	126.5	126.3	126.2	126.1	126.0	125.9
50	125.8	125.8	125.7	125.6	125.5	125.4	125.3	125.2	125.2	125.1
60	125.0	124.9	124.9	124.8	124.7	124.6	124.6	124.5	124.4	124.4
70	124.3	124.3	124.2	124.1	124.1	124.0	124.0	123.9	123.8	123.8
80	123.7	123.7	123.6	123.5	123.5	123.5	123.4	123.4	123.3	123.3
90	123.2	123.2	123.1	123.1	123.1	123.0	123.0	122.9	122.9	122.8
100	122.8	122.8	122.7	122.7	122.6	122.6	122.6	122.5	122.5	122.5
110	122.4	122.4	122.3	122.3	122.3	122.2	122.2	122.2	122.1	122.1
120	122.1	122.0	122.0	122.0	121.9	121.9	121.9	121.8	121.8	121.8
130	121.8	121.7	121.7	121.7	121.6	121.6	121.6	121.6	121.5	121.5
140	121.5	121.4	121.4	121.4	121.4	121.3	121.3	121.3	121.3	121.2
150	121.2	121.2	121.2	121.1	121.1	121.1	121.1	121.0	121.0	121.0
160	121.0	120.9	120.9	120.9	120.9	120.9	120.8	120.8	120.8	120.8
170	120.7	120.7	120.7	120.7	120.7	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6
180	120.5	120.5	120.5	120.5	120.5	120.4	120.4	120.4	120.4	120.4
190	120.3	120.3	120.3	120.3	120.3	120.3	120.3	120.2	120.2	120.2
200	120.2									

moyenne de trois essais

10 → 14.7%

20 → 7.1%

100 → 6.4%

120 → 5.9%

250 → 4.3%

a 44% de bitume

TROXLER 4140 Gyrotory Compactor

0.1

Sample ID: 94-1125

Time: 11:27 am

Date: 3/08/98

Serial Number: 106
Pressure: 600. kPa

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	150.5	144.2	142.3	140.5	139.2	137.9	137.0	136.1	135.4	134.7
10	134.2	133.7	132.2	132.8	132.4	132.0	131.7	131.3	131.0	130.7
20	130.5	130.3	130.0	129.8	129.5	129.4	129.1	128.9	128.8	128.6
30	128.4	128.2	128.1	127.9	127.8	127.6	127.5	127.3	127.2	127.1
40	126.9	126.8	126.7	126.6	126.5	126.3	126.2	126.1	126.0	125.9
50	125.8	125.8	125.7	125.6	125.5	125.4	125.3	125.2	125.2	125.1
60	125.0	124.9	124.9	124.8	124.7	124.6	124.6	124.5	124.4	124.4
70	124.3	124.3	124.2	124.1	124.1	124.0	124.0	123.9	123.8	123.8
80	123.7	123.7	123.6	123.5	123.5	123.5	123.4	123.4	123.3	123.3
90	123.2	123.2	123.1	123.1	123.1	123.0	123.0	122.9	122.9	122.8
100	122.8	122.8	122.7	122.7	122.6	122.6	122.6	122.5	122.5	122.5
110	122.4	122.4	122.3	122.3	122.3	122.2	122.2	122.2	122.1	122.1
120	122.1	122.0	122.0	122.0	121.9	121.9	121.9	121.8	121.8	121.8
130	121.8	121.7	121.7	121.7	121.6	121.6	121.6	121.6	121.5	121.5
140	121.5	121.4	121.4	121.4	121.4	121.3	121.3	121.3	121.3	121.2
150	121.2	121.2	121.2	121.1	121.1	121.1	121.1	121.0	121.0	121.0
160	121.0	120.9	120.9	120.9	120.9	120.9	120.8	120.8	120.8	120.8
170	120.7	120.7	120.7	120.7	120.7	120.6	120.6	120.6	120.6	120.6
180	120.5	120.5	120.5	120.5	120.5	120.4	120.4	120.4	120.4	120.4
190	120.3	120.3	120.3	120.3	120.3	120.3	120.3	120.2	120.2	120.2
200	120.2									

moyenne de trois essais

10 → 14.7%

20 → 7.1%

100 → 6.4%

120 → 5.9%

250 → 4.3%

a 4.4% de bitume

5.1

DATE: 3/08/75

Serial NUMBER: 106
Pressure: 600. KPa

[illegible]

□ □ □

DATE: 3/08/78

Serial NUMBER: 106
Pressure: 600. KPa

[illegible]



Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports

Direction Lab. des chaussées

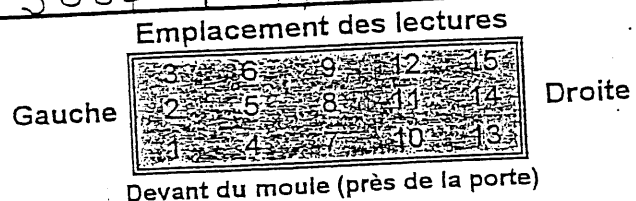
Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés
Partie 1 : Essai d'orniérage
(Compilation des ornières)

NORME: NF P 98-253-1 (JUILLET 1991)

No. lab.	Type d'enrobé	Moule no.	Hauteur(mm)	Essai(T°C)	No. Porte	Code(voir verso)
97-1185 R	EB-20	6	100	60	A	

Cycles	3	6	9	12	15
1000 à froid	4545	4460	4582	4351	4083
100					
300					
1000					
3000					
10000					
17000					
	4871	5051	5110	4691	4652
Cycles	2	5	8	11	14
1000 à froid	4769	4558	4424	4394	4138
100					
300					
1000					
3000					
10000					
17000					
	5228	5222	5229	4889	4631
Cycles	1	4	7	10	13
1000 à froid	4508	4504	4557	4265	4175
100					
300					
1000					
3000					
10000					
17000					
	5061	5102	5007	4724	4648
Client					

Equipements	
Orniéreur vert no: 002541	<input checked="" type="checkbox"/>
Orniéreur rouge no: 004906	<input type="checkbox"/>
Pied à coulisse no: 003640	
Guide à lecture no: 100	<input checked="" type="checkbox"/>
Guide à lecture no: 50	<input type="checkbox"/>



Note: L'opérateur peut changer l'ordre des lectures

Plaque préparée par:	L.S
Essai effectué par:	P.P
Date de l'essai:	98-03-13

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

(MICROSOFT EXCEL) 4 NOVEMBRE 1997

Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés
Partie 1 : Essai d'orniérage
(Compilation des ornières)

NORME: NF P 98-253-1 (JUILLET 1991)

No. lab.	Type d'enrobé	Moule no.	Hauteur(mm)	Essai(T°C)	No. Porte	Code(voir verso)
97-1185 R	EB-20	6	100	60	A	

Cycles	3	6	9	12	15
1000 à froid	4545	4460	4522	4351	4083
100					
300					
1000					
3000					
10000					
17000					
	4871	5051	5110	4691	4652
Cycles	2	5	8	11	14
1000 à froid	4769	4558	4424	4394	4138
100					
300					
1000					
3000					
10000					
17000					
	5228	5222	5229	4889	4631
Cycles	1	4	7	10	13
1000 à froid	4508	4504	4557	4265	4175
100					
300					
1000					
3000					
10000					
17000					
	5061	5102	5007	4724	4648
Client					

Emplacement des lectures

Gauche

3	6	9	12	15
2	5	8	11	14
1	4	7	10	13

Droite

Devant du moule (près de la porte)

Note: L'opérateur peut changer l'ordre des lectures

Equipements	
Orniéreur vert no: 002541	<input checked="" type="checkbox"/>
Orniéreur rouge no: 004906	<input type="checkbox"/>
Pied à coulisse no: 003640	<input type="checkbox"/>
Guide à lecture no: 100	<input checked="" type="checkbox"/>
Guide à lecture no: 50	<input type="checkbox"/>

Plaque préparée par:	J.S
Essai effectué par:	P.P
Date de l'essai:	98-03-13

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

(MICROSOFT EXCEL) 4 NOVEMBRE 1997

Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés
Partie 1 : Essai d'orniérage
(Points de contrôle et notes)

NORME: NF P 98-253-1 (JUILLET 1991)

Points de contrôle					Conformité	
					Oui	Non
Pression des pneus à froid (6 bars)					✓	
Vérification de la température d'essai					✓	
Réglage des deux compteurs					✓	
Orniéreur vert seulement						
Plaque de 50mm : désactiver l'interrupteur du haut						
Plaque de 100mm : activer l'interrupteur du haut					✓	
Vérification de l'ornière en mode automatique Comparer l'ornière inscrite sur la sortie d'impression et celle obtenue par la prise initiale et finale manuellement (En mode automatique seulement) Si l'écart est supérieur à 2mm prendre l'ornière MAN sinon le résultat de l'ornière AUT est utilisé.						
Lectures moyennes		Ornières		Écart	Ornière conservée	
Initiale I	Finale F	(F - I) MANUEL	Programme AUTOMAT.	MAN - AUT E	E > 2,5mm Manuel*	E ≤ 2,5mm Automatique
65443	79145	13.7	12.3	1.4		12.3

* : La courbe est ajustée afin de respecter le comportement obtenu en mode automatique.

Description des codes

- A Saignement de la plaque après 1000 cycles à froid
- B Arrachement après 1000 cycles à froid
- C Saignement de la plaque et arrachement après 1000 cycles à froid
- D Saignement de la plaque à la fin de l'essai
- E Arrachement à la fin de l'essai
- F Saignement de la plaque et arrachement à la fin de l'essai
- G Voir la note ci-bas

Note:

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés
Partie 1 : Essai d'orniérage
(Points de contrôle et notes)

NORME: NF P 98-253-1 (JUILLET 1991)

Points de contrôle				Conformité		
				Oui	Non	
Pression des pneus à froid (6 bars)				✓		
Vérification de la température d'essai				✓		
Réglage des deux compteurs				✓		
Orniéreur vert seulement						
Plaque de 50mm : désactiver l'interrupteur du haut						
Plaque de 100mm : activer l'interrupteur du haut				✓		
Vérification de l'ornière en mode automatique Comparer l'ornière inscrite sur la sortie d'impression et celle obtenue par la prise initiale et finale manuellement (En mode automatique seulement) Si l'écart est supérieur à 2mm prendre l'ornière MAN, sinon le résultat de l'ornière AUT est utilisé.						
Lectures moyennes		Ornières		Écart	Ornière conservée	
Initiale I	Finale F	(F - I) MANUEL	Programme AUTOMAT.	MAN - AUT E	E > 2,5mm Manuel*	E ≤ 2,5mm Automatique
66255	74116	7.86	5.9	1.96		5.9

* : La courbe est ajustée afin de respecter le comportement obtenu en mode automatique.

Description des codes

- A Saignement de la plaque après 1000 cycles à froid
- B Arrachement après 1000 cycles à froid
- C Saignement de la plaque et arrachement après 1000 cycles à froid
- D Saignement de la plaque à la fin de l'essai
- E Arrachement à la fin de l'essai
- F Saignement de la plaque et arrachement à la fin de l'essai
- G Voir la note ci-bas

Note:

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 644-0181 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

GB-20

ORDINAIRE											POLYMERÉ										
Poutres	M sec	M eau	M sss	T*	corr.	D brute	D max	% comp	Hauteur	Largeur	M sec	M eau	M sss	T*	corr.	D brute	D max	% comp	Hauteur	Largeur	
A1	2 989,0	1 792,4	3 003,0	20,3	1,001100	2,472	2,648	93,3	51,26	64,02	3 231,8	1 919,9	3 238,2	22,9	1,000518	2,453	2,648	92,6	54,04	64,78	
A2											3 119,8	1 860,7	3 125,7	22,9	1,000518	2,468	2,648	93,2	51,83	64,84	
B1	3 033,6	1 801,8	3 041,4	20,3	1,001100	2,450	2,648	92,5	52,49	63,24	3 217,9	1 921,3	3 224,1	22,9	1,000518	2,471	2,648	93,3	53,15	65,16	
B2	3 100,2	1 855,5	3 112,1	20,3	1,001100	2,470	2,648	93,3	52,14	65,12	3 380,3	2 013,3	3 385,0	22,9	1,000518	2,466	2,648	93,1	53,98	67,39	
C1	3 063,7	1 836,7	3 075,3	20,3	1,001100	2,476	2,648	92,8	51,94	64,01	3 184,6	1 894,1	3 194,0	22,9	1,000518	2,451	2,648	92,6	52,74	65,59	
C2	3 036,3	1 807,8	3 045,3	20,2	1,001121	2,456	2,648	93,1	51,60	64,75	3 225,3	1 920,6	3 229,4	23,0	1,000495	2,466	2,648	93,1	52,49	65,88	
D1	3 017,0	1 804,8	3 030,0	20,2	1,001121	2,465	2,648	92,8	51,93	65,01	3 210,6	1 916,8	3 218,6	23,0	1,000495	2,467	2,648	93,2	52,78	65,54	
D2	3 077,0	1 830,2	3 084,2	20,1	1,001142	2,457	2,648	93,6	51,62	63,16	3 074,4	1 821,4	3 078,9	23,0	1,000495	2,446	2,648	92,4	52,14	64,08	
E1	2 988,8	1 788,2	2 995,9	20,1	1,001142	2,478	2,648	93,0	51,21	64,17	3 163,6	1 884,5	3 171,6	23,0	1,000495	2,459	2,648	92,9	52,25	64,64	
E2	3 020,2	1 798,5	3 026,1	20,0	1,001162	2,463	2,648	93,7	50,82	64,22	3 162,3	1 896,1	3 178,0	22,5	1,000612	2,468	2,648	93,2	52,49	64,51	
F1	3 007,9	1 800,0	3 014,0	20,0	1,001162	2,481	2,648	92,6	51,98	64,45	3 057,4	1 824,6	3 073,7	22,5	1,000612	2,449	2,648	92,5	52,23	63,60	
F2	3 044,1	1 808,9	3 051,2	20,0	1,001162	2,453	2,648	92,3	50,44	62,92	3 144,0	1 869,8	3 152,4	22,5	1,000612	2,453	2,648	92,6	51,70	64,46	
G1	2 915,2	1 728,2	2 921,9	19,9	1,001183	2,445	2,648	93,1	51,96	64,49	2 974,6	1 767,4	2 987,5	22,5	1,000612	2,439	2,648	92,1	51,20	63,41	
G2	3 068,9	1 832,8	3 079,6	19,9	1,001183	2,464	2,648	93,6	53,85	64,33	3 282,9	1 959,6	3 288,5	22,5	1,000612	2,472	2,648	93,3	52,74	66,04	
H1	3 159,3	1 891,5	3 167,3	19,9	1,001183	2,479	2,648	93,2	51,25	64,28	2 976,3	1 783,1	2 985,1	22,5	1,000612	2,478	2,648	93,6	50,58	63,39	
H2	3 014,6	1 797,0	3 019,6	19,8	1,001203	2,469	2,648	93,5	52,28	63,59	3 098,5	1 855,4	3 108,1	22,5	1,000612	2,475	2,648	93,5	52,06	63,88	
I1	3 021,9	1 809,6	3 031,4	19,8	1,001203	2,476	2,648	92,5	50,56	65,17	3 143,1	1 872,8	3 147,1	22,5	1,000612	2,468	2,648	93,2	52,76	63,87	
I2	2 980,4	1 770,9	2 988,8	19,8	1,001203	2,450	2,648	93,0	53,00	64,41	3 113,4	1 862,3	3 122,1	22,5	1,000612	2,473	2,648	93,4	52,17	63,85	
J1	3 128,2	1 862,8	3 135,0	19,8	1,001203	2,462	2,648	93,7	51,74	64,51	3 069,8	1 828,1	3 074,5	22,5	1,000612	2,464	2,648	93,1	51,76	63,72	
J2	3 094,4	1 857,7	3 106,4	19,8	1,001203	2,481	2,648	93,2	51,61	63,37	3 051,1	1 828,7	3 069,3	22,5	1,000612	2,461	2,648	92,9	52,41	63,24	
K1	2 983,5	1 782,5	2 992,3	20,0	1,001162	2,469	2,648	93,3	51,78	64,16	2 943,3	1 753,1	2 948,9	22,5	1,000612	2,463	2,648	93,0	49,41	63,26	
K2	3 046,7	1 828,9	3 062,9	20,0	1,001162	2,472	2,648	93,3	51,82	64,43	3 118,2	1 868,0	3 123,2	22,5	1,000612	2,486	2,648	93,9	52,49	63,06	
L1	3 063,8	1 836,5	3 078,0	19,5	1,001264	2,471	2,648	92,8	51,65	64,10	3 129,7	1 878,6	3 139,4	22,5	1,000612	2,484	2,648	93,8	51,11	64,32	
L2	3 028,6	1 803,9	3 038,2	19,5	1,001264	2,457	2,648	93,3	51,45	63,97	3 140,7	1 878,2	3 158,1	22,5	1,000612	2,455	2,648	92,7	53,97	62,74	
M1	2 988,1	1 797,7	3 009,1	19,5	1,001264	2,470	2,648	93,3	50,07	64,78	3 082,2	1 830,4	3 091,9	22,5	1,000612	2,445	2,648	92,3	52,20	64,21	
M2	2 973,5	1 775,5	2 981,1	19,5	1,001264	2,470	2,648	93,3	52,83	62,51	3 036,2	1 813,8	3 041,2	19,0	1,001365	2,477	2,648	93,5	50,88	64,24	
N1	3 034,3	1 824,9	3 054,2	19,3	1,001304	2,472	2,648	92,7	51,57	63,09	3 156,4	1 894,5	3 166,4	19,0	1,001365	2,485	2,648	93,8	52,04	65,20	
N2	2 961,5	1 767,5	2 975,1	19,3	1,001304	2,456	2,648	92,6	51,42	63,44	3 146,4	1 876,8	3 150,8	19,0	1,001365	2,473	2,648	93,4	52,17	64,83	
O1	2 998,4	1 782,6	3 006,9	19,1	1,001345	2,452	2,648	93,9	51,19	63,56	3 154,6	1 895,2	3 165,5	19,0	1,001365	2,487	2,648	93,9	52,30	64,69	
O2	3 015,4	1 816,4	3 031,2	19,1	1,001345	2,486	2,648	92,1	51,40	63,36	3 039,3	1 820,3	3 052,7	19,0	1,001365	2,470	2,648	93,3	51,63	64,49	
P1	2 966,2	1 766,6	2 984,2	18,5	1,001461	2,440	2,648	93,0	51,29	63,60	3 045,4	1 812,3	3 053,7	19,0	1,001365	2,457	2,648	92,8	51,56	64,44	
P2	2 962,5	1 784,1	2 988,3	18,5	1,001461	2,464	2,648	92,5	50,51	64,82	3 156,7	1 883,5	3 163,7	19,0	1,001365	2,469	2,648	93,2	52,39	65,54	
Q1	2 974,1	1 771,7	2 988,0	18,3	1,001499	2,449	2,648	92,5	51,22	64,19	2 977,1	1 782,9	2 986,6	19,0	1,001365	2,477	2,648	93,5	50,27	64,27	
Q2	2 981,0	1 770,2	2 988,7	18,3	1,001499	2,450	2,648	92,5	51,29	63,83	2 928,8	1 752,7	2 941,4	19,0	1,001365	2,467	2,648	93,2	50,47	63,34	
R1	2 941,7	1 768,9	2 972,4	18,0	1,001555	2,448	2,648	92,5	52,51	64,04	2 937,1	1 751,3	2 943,8	19,0	1,001365	2,466	2,648	93,1	50,75	62,90	
R2	3 046,5	1 815,8	3 061,2	18,0	1,001555	2,450	2,648	93,0	51,16	63,77	3 068,5	1 825,2	3 074,6	19,0	1,001365	2,459	2,648	92,9	51,55	65,27	
S1	2 974,1	1 771,3	2 981,4	17,7	1,001610	2,462	2,648	93,4	51,67	64,29	3 009,2	1 802,2	3 017,1	19,0	1,001365	2,480	2,648	93,7	50,90	63,85	
S2	3 059,2	1 835,8	3 074,4	17,7	1,001610	2,474	2,648	92,7	52,28	64,36	2 992,4	1 780,9	3 013,7	19,0	1,001365	2,431	2,648	91,8	52,02	63,51	
T1	3 063,0	1 832,4	3 081,7	17,5	1,001646	2,456	2,648	93,2	51,82	63,49	3 022,5	1 808,9	3 046,2	19,0	1,001365	2,446	2,648	92,4	51,44	64,73	
T2	2 999,6	1 804,3	3 021,5	17,5	1,001646	2,468	2,648	92,9	52,48	65,31	3 091,8	1 838,4	3 108,6	20,4	1,001079	2,437	2,648	92,0	52,11	65,45	
U1	3 158,5	1 894,2	3 180,0	20,4	1,001079	2,459	2,648	92,3	51,95	64,70	3 113,0	1 853,9	3 129,5	20,4	1,001079	2,443	2,648	92,3	52,77	64,42	
U2	3 092,6	1 835,6	3 102,8	20,4	1,001079	2,443	2,648	92,2	53,17	65,20	3 136,5	1 869,3	3 145,2	20,4	1,001079	2,461	2,648	92,9	52,18	65,27	
V1	3 168,1	1 902,7	3 202,0	20,4	1,001079	2,441	2,648	92,2	53,70	65,28	3 177,1	1 900,2	3 187,8	20,4	1,001079	2,470	2,648	93,3	53,17	64,78	
V2	3 205,9	1 908,3	3 222,6	20,4	1,001079	2,442	2,648				3 165,2	1 882,3	3 170,3	20,4	1,001079	2,460	2,648	92,9	51,88	66,22	
W1											3 003,2	1 795,5	3 015,3	20,4	1,001079	2,465	2,648	93,1	50,88	64,95	
W2											3 137,0	1 874,2	3 148,0	20,4	1,001079	2,465	2,648	93,1	51,64	65,36	
X1											3 072,1	1 827,8	3 075,8	20,4	1,001079	2,464	2,648	93,1	51,03	64,65	
X2																			52,57	65,67	
Y1																			52,51	64,77	
Y2																			51,01	65,06	
Z1																			51,83	64,50	
Z2																					

ANNEXE IV

Résultats de la caractérisation des enrobés de base ESG-14 et GB-20.

ESG-14 ordinaire
Température = 20°C

Température = 20°C																						
Poutres	50 cycles			½ So							Rupture							S _o S _r /S _o S _o /S ₅₀ S _r /S ₅₀				
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _r	ε _r	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S _o (MPa)	S _r /S _o (%)	S _o /S ₅₀	S _r /S ₅₀	
P2	590	3 080	39,5	34 000	599	1,02	1 540	50,0	46,9	1,19	71 000	596	1,01	479	15,6	49,1	1,24	2 254	21,3	73,2	68,3	
O1	587	2 940	39,6	53 000	589	1,00	1 470	50,0	47,1	1,19	90 000	585	1,00	736	25,0	48,1	1,16	2 050	35,9	69,7	71,7	
N1	572	2 830	40,2	68 000	581	1,02	1 410	49,8	47,4	1,18	110 000	584	1,02	1 000	35,3	48,3	1,20	2 015	49,6	71,2	70,0	
N2	380	3 140	37,6	300 000	373	0,98	1 560	49,7	44,5	1,18	530 000	382	1,01	1 070	34,1	45,5	1,21	2 203	48,6	70,2	70,8	
P1	370	3 120	37,0	350 000	374	1,01	1 550	49,7	45,0	1,22	710 000	373	1,01	831	26,6	47,2	1,28	2 159	38,5	69,2	71,8	
moy	3 022	38,8			1,01	1 506	49,8	46,2	1,19				1,01	823	27,3	47,2	1,22	2 136	38,8	70,7	70,5	
écart	133	1,4			0,01	64	0,2	1,3	0,01				0,01	234	8,0	1,5	0,04	101	11,5	1,6	1,4	
CV	4,4	3,6			1,4	4,3	0,3	2,9	1,2				0,9	28,4	29,2	3,2	3,5	4,7	29,7	2,2	2,0	

ESG-14 ordinaire
Température = 15°C

Temperature = 15°C																						
Poutres	50 cycles			½ So							Rupture							S _o				
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _r	ε _r	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S _o (MPa)	S _r /S _o (%)	S _o /S ₅₀	S _r /S _o	
E1	477	5 000	29,8	43 000	494	1,04	2 480	49,6	37,7	1,27	58 000	500	1,05	1 160	23,2	37,9	1,27	4 045	28,7	80,9	61,3	
M1	475	5 290	29,6	57 000	490	1,03	2 630	49,7	37,2	1,26	98 000	499	1,05	1 350	25,5	37,9	1,28	4 124	32,7	78,0	63,8	
D1	472	4 120	32,4	61 000	488	1,03	2 060	50,0	38,7	1,19	74 000	496	1,05	1 450	35,2	39,0	1,20	3 404	42,6	82,6	60,5	
E2	270	5 070	28,2	850 000	264	0,98	2 530	49,9	34,7	1,23	1 000 000	267	0,99	2 170	42,8	34,9	1,24	4 113	52,8	81,1	61,5	
D2	267	5 140	28,3	510 000	274	1,03	2 560	49,8	34,8	1,23	850 000	279	1,04	1 050	20,4	34,4	1,22	3 957	26,5	77,0	64,7	
M2	263	5 910	27,3	390 000	273	1,04	3 000	50,8	33,8	1,24	420 000	273	1,04	2 170	36,7	34,3	1,26	5 131	42,3	86,8	58,5	
moy	5 088	29,3				1,02	2 543	50,0	36,2	1,24				1,04	1 558	30,6	36,4	1,24	4 129	37,6	81,1	61,7
écart	577	1,8				0,02	301	0,4	2,0	0,02				0,02	494	8,8	2,1	0,03	560	10,0	3,5	2,2
CV	11,3	6,1				2,2	11,8	0,8	5,5	2,0				2,3	31,7	28,9	5,8	2,5	13,6	26,7	4,3	3,6

ESG-14 ordinaire
Température = 10°C

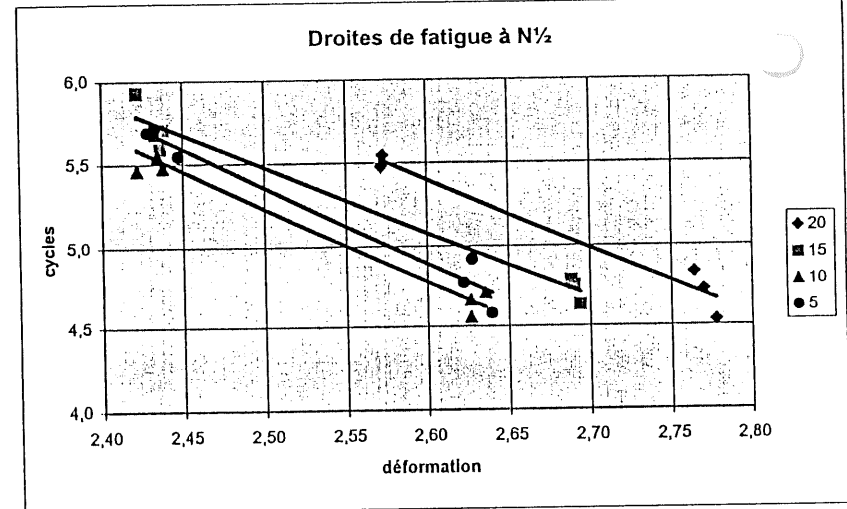
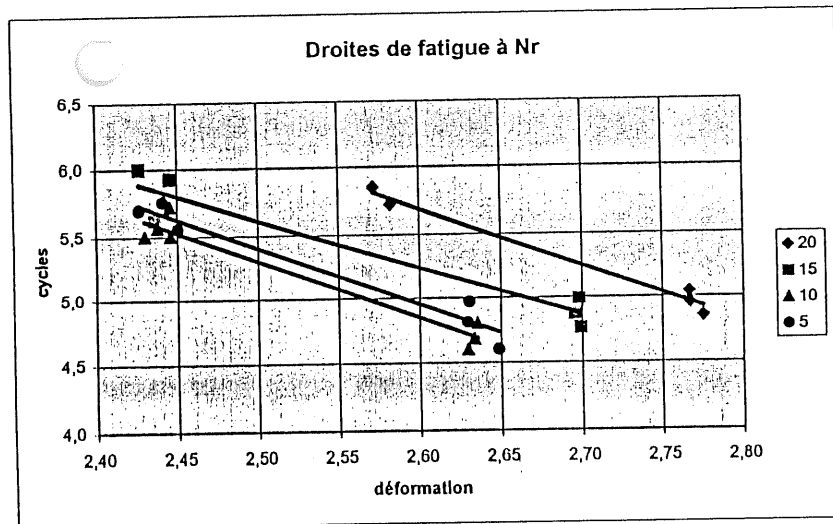
Température = 10°C																							
Poutres	50 cycles			½ So								Rupture								S _o			
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _r	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S _o (MPa)	S _r /S _o (%)	S _o /S ₅₀	S _r /S _o		
G1	415	6 870	21,5	46 000	423	1,02	3 370	49,1	27,9	1,30	48 000	430	1,04	2 760	40,2	28,4	1,32	6 394	43,2	93,1	52,7		
C2	413	6 830	21,5	36 000	423	1,02	3 490	51,1	27,4	1,27	40 000	426	1,03	2 320	34,0	28,0	1,30	6 330	36,7	92,7	55,1		
F1	412	6 690	22,1	51 000	432	1,05	3 360	50,2	28,4	1,29	63 000	432	1,05	1 730	25,9	26,5	1,20	6 445	26,8	96,3	52,1		
L1	266	7 070	23,0	300 000	274	1,03	3 520	49,8	36,4	1,58	320 000	279	1,05	2 760	39,0	26,9	1,17	6 366	43,4	90,0	55,3		
G2	263	6 860	20,6	350 000	272	1,03	3 540	51,6	25,9	1,26	370 000	274	1,04	2 660	38,8	26,2	1,27	6 530	40,7	95,2	54,2		
H1	263	7 880	20,6	290 000	264	1,00	3 890	50,7	25,3	1,23	320 000	269	1,02	2 650	34,5	25,2	1,22	6 552	40,4	85,3	59,4		
F2	262	6 850	20,9	480 000	271	1,03	3 450	50,4	26,0	1,24	530 000	279	1,06	2 040	29,8	25,8	1,23	6 557	31,1	95,7	52,6		
moy	6 979	21,5			1,03	3 517	50,4	28,2	1,31				1,04	2 417	34,6	26,7	1,25	6 453	37,5	92,6	54,5		
écart	329	0,9			0,01	178	0,8	3,8	0,12				0,01	403	5,3	1,2	0,05	94	6,3	3,9	2,5		
CV	4,7	4,1			1,4	5,1	1,7	13,5	9,4				1,3	16,7	15,3	4,3	4,4	1,5	16,9	4,2	4,6		

ESG-14 ordinaire
Température = 5°C

Température = 5°C																						
Poutres	50 cycles			½ So							Rupture								S _o			
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _r	ε _r	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r	φ _r /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S _o (MPa)	S _r /S _o (%)	S _o /S ₅₀	S _r /S ₅₀	
K1	426	8 980	15,8	38 000	436	1,02	4 580	51,0	19,6	1,24	40 000	445	1,04	3 340	37,2	19,4	1,23	8 665	38,5	96,5	52,9	
J1	414	8 920	15,8	83 000	424	1,02	4 480	50,2	19,2	1,22	93 000	427	1,03	3 800	42,6	19,4	1,23	8 357	45,5	93,7	53,6	
I2	413	9 080	15,3	59 000	419	1,01	4 450	49,0	19,2	1,25	64 000	426	1,03	3 040	33,5	19,6	1,28	8 759	34,7	96,5	50,8	
I1	262	9 760	11,1	490 000	268	1,02	4 860	49,8	17,9	1,61	500 000	267	1,02	3 900	40,0	17,0	1,53	9 825	39,7	100,7	49,5	
K2	260	9 300	15,6	350 000	280	1,08	4 980	53,5	18,5	1,19	360 000	282	1,08	3 930	42,3	18,4	1,18	9 142	43,0	98,3	54,5	
J2	255	9 150	15,4	520 000	271	1,06	4 550	49,7	17,8	1,16	570 000	276	1,08	3 400	37,2	17,4	1,13	9 135	37,2	99,8	49,8	
moy	9 198	14,8				1,04	4 650	50,6	18,7	1,28			1,05	3 568	38,8	18,5	1,26	8 981	39,8	97,6	51,8	
écart	306	1,8				0,03	218	1,6	0,7	0,17			0,03	362	3,5	1,1	0,14	510	3,9	2,6	2,1	
CV	3,3	12,4				2,5	4,7	3,2	4,0	13,2			2,7	10,1	9,0	6,1	11,2	5,7	9,8	2,6	4,0	

ESG-14 ordinaire
Température = 0°C

Température = 0°C																						
Poutres	50 cycles			½ So							Rupture								S _o			
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _r	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S _o (MPa)	S _r /S _o (%)	S _o /S ₅₀	S _r /S _o	
R1	301	12 000	10,5	430 000	310	1,03	5 950	49,6	13,0	1,24	380 000	308	1,02	6 860	57,2	12,8	1,22	11 847	57,9	98,7	50,2	
R2	304	12 300	10,2	260 000	314	1,03	6 400	52,0	12,2	1,20	260 000	314	1,03	6 400	52,0	12,2	1,20	11 842	54,0	96,3	54,0	
moy.	12 150	10,4		345 000		1,03	6 175	50,8	12,6	1,22	320 000		1,03	6 630	54,6	12,5	1,21	11 845	56,0	97,5	52,1	
écart.	212	0,1				0,00	318	1,7	0,6	0,03			0,01	325	3,6	0,4	0,02	4	2,7	1,7	2,7	
CV	1,7	1,0				0,2	5,2	3,4	4,5	2,4			0,7	4,9	6,6	3,4	1,3	0,0	4,9	1,8	5,2	



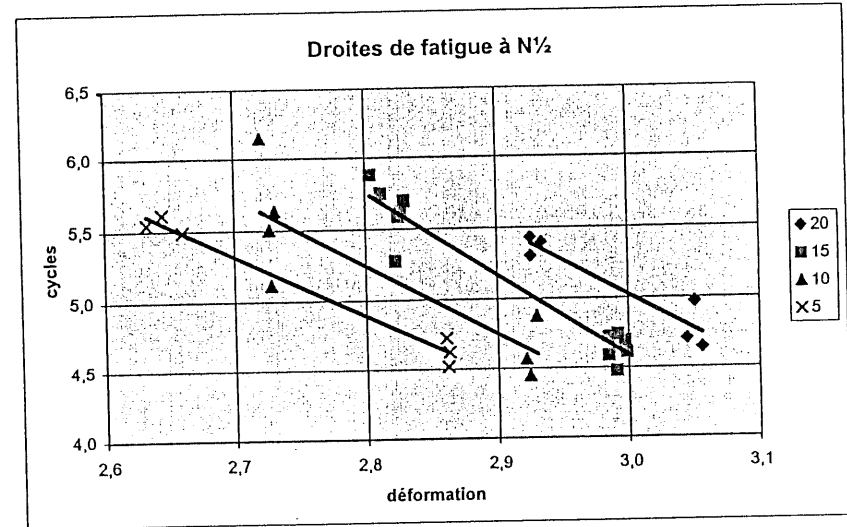
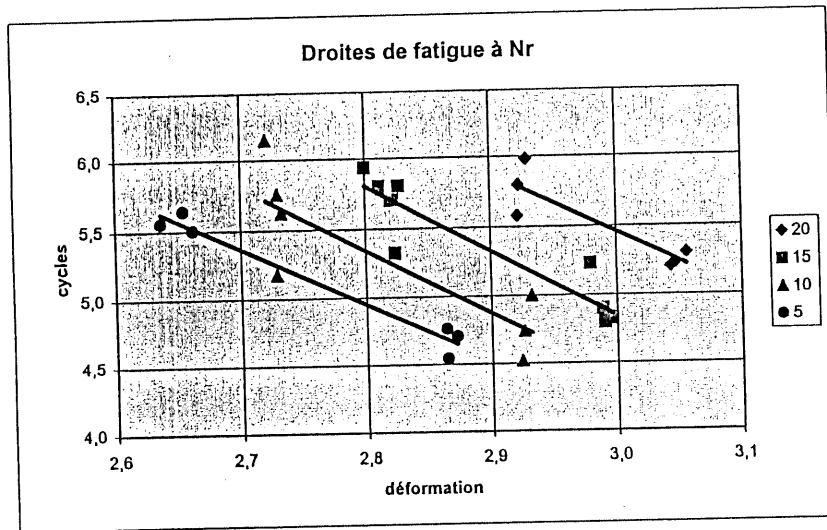
Droites de fatigue à Nr

Température	Pente	Ordonnée	$\sigma(N_{1/2})^*$	ϵ_6	$\sigma(N_6)$
5	-4,51	16,67	0,117	233	0,151
10	-4,52	16,61	0,120	221	0,153
15	-3,74	14,95	0,160	249	0,193
20	-4,38	17,07	0,070	338	0,094
Moyenne	-4,29				
Ecart	0,373				

* $\sigma(N_{1/2})$ SHRP = 0,390

Droites de fatigue à N½

Température	Pente	Ordonnée	$\sigma(N_{1/2})^*$	ϵ_6	$\sigma(N_6)$
5	-4,66	17,00	0,108	230	0,140
10	-4,52	16,52	0,107	214	0,138
15	-3,96	15,37	0,111	233	0,138
20	-4,14	16,17	0,106	285	0,164
Moyenne	-4,32				
Ecart	0,324				



Droites de fatigue à N_r

Température	Pente	Ordonnée	$\sigma(N_{1/2})^*$	ϵ_6	$\sigma(N_6)$
5	-4,13	16,51	0,102	351	0,138
10	-4,64	18,34	0,341	455	0,416
15	-4,78	19,20	0,165	574	0,189
20	-4,26	18,23	0,163	746	0,214
Moyenne	-4,45				
Écart	0,310				

* $\sigma(N_{1/2})$ SHRP = 0,390

Droites de fatigue à $N_{1/2}$

Température	Pente	Ordonnée	$\sigma(N_{1/2})^*$	ϵ_6	$\sigma(N_6)$
5	-4,29	16,89	0,083	347	0,112
10	-4,90	18,96	0,353	442	0,439
15	-5,82	22,05	0,147	572	0,170
20	-4,93	19,82	0,132	634	0,219
Moyenne	-4,98				
Écart	0,632				

Enrobé GB-20 formulé avec un bitume ordinaire

Température = 5°C

Poutres	30 Hz		10 Hz		3 Hz		1 Hz		30 Hz (reprise)	
	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)
AB2	10 549	9,9	9 664	11,9	8 201	14,6	6 817	17,9	10 580	9,6
AB1	10 792	9,5	9 882	11,9	8 354	14,8	6 927	18,2	10 811	9,7
AA1	10 868	9,6	9 973	12,0	8 434	14,9	6 987	18,3	10 947	9,6
moyenne	10 736	9,7	9 840	11,9	8 329	14,8	6 910	18,1	10 779	9,6
écart type	166	0,2	159	0,1	119	0,1	86	0,2	185	0,0
% CV	1,6	2,2	1,6	0,5	1,4	1,0	1,2	1,3	1,7	0,4

Température = 10°C

Poutres	30 Hz		10 Hz		3 Hz		1 Hz		30 Hz (reprise)	
	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)
AB2	8 798	12,9	7 857	15,7	6 334	19,6	4 925	23,8	8 782	13,1
AB1	8 560	13,5	7 550	16,5	6 001	20,5	4 634	24,8	8 605	13,5
AA1	9 253	12,0	8 074	16,0	6 456	20,1	4 991	24,6	9 244	12,2
moyenne	8 871	12,8	7 827	16,0	6 264	20,1	4 850	24,4	8 877	12,9
écart type	352	0,8	263	0,4	236	0,4	190	0,5	330	0,7
% CV	4,0	6,0	3,4	2,4	3,8	2,2	3,9	2,1	3,7	5,2

Température = 15°C

Poutres	30 Hz		10 Hz		3 Hz		1 Hz		30 Hz (reprise)	
	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)
AB2	5 896	11,6	6 289	22,0	4 409	27,6	3 091	32,8	5 813	11,8
AB1	5 893	13,4	6 647	24,8	4 593	28,9	3 198	33,8	5 882	14,3
AA1	6 149	13,6	6 645	23,0	4 607	28,4	3 201	33,8	6 104	13,8
moyenne	5 979	12,9	6 527	23,3	4 536	28,3	3 163	33,5	5 933	13,3
écart type	147	1,1	206	1,4	111	0,7	63	0,6	152	1,3
% CV	2,5	8,4	3,2	6,0	2,4	2,4	2,0	1,7	2,6	10,1

Température = 20°C

Poutres	30 Hz		10 Hz		3 Hz		1 Hz		30 Hz (reprise)	
	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)
AB2	4 275	20,6	4 087	30,2	2 643	35,3	1 712	39,8	4 223	21,2
AB1	4 473	20,7	4 167	29,9	2 702	35,5	1 729	40,4	4 386	21,0
AA1	4 503	21,4	4 180	30,5	2 700	35,9	1 730	40,7	4 490	21,7
moyenne	4 417	20,9	4 144	30,0	2 682	35,6	1 724	40,3	4 305	21,3
écart type	124	0,4	50	0,2	33	0,3	10	0,4	115	0,4
% CV	2,8	2,0	1,2	0,8	1,2	0,9	0,6	1,1	2,7	1,7

Enrobé GB-20 formulé avec un bitume polymère

Température = 5°C

Poutres	30 Hz		10 Hz		3 Hz		1 Hz		30 Hz (reprise)	
	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)
AB3	7 783	14,9	6 818	18,0	5 346	22,0	4 072	26,3	7 897	14,8
AB2	8 185	14,6	7 172	17,7	5 629	21,6	4 302	25,9	8 301	14,5
AA2	8 783	14,7	7 736	17,7	6 098	21,4	4 657	25,6	8 874	14,7
moyenne	8 250	14,7	7 242	17,8	5 691	21,7	4 344	25,9	8 357	14,7
écart type	503	0,2	463	0,2	380	0,3	295	0,3	491	0,2
% CV	6,1	1,2	6,4	1,0	6,7	1,3	6,8	1,3	5,9	1,0

Température = 10°C

Poutres	30 Hz		10 Hz		3 Hz		1 Hz		30 Hz (reprise)	
	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)
AB3	6 321	19,4	5 253	22,9	3 840	27,7	2 728	32,4	6 389	19,6
AB2	6 431	15,9	5 390	22,9	3 922	27,9	2 776	32,5	6 485	19,6
AA2	6 965	19,3	5 825	22,5	4 260	27,2	3 033	31,8	6 967	19,4
moyenne	6 572	18,2	5 490	22,8	4 007	27,6	2 846	32,2	6 614	19,5
écart type	344	2,0	299	0,2	223	0,4	164	0,4	310	0,1
% CV	5,2	11,1	5,4	1,0	5,6	1,3	5,8	1,1	4,7	0,6

Température = 15°C

Poutres	30 Hz		10 Hz		3 Hz		1 Hz		30 Hz (reprise)	
	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)
AB3	3 784	23,3	3 517	31,3	2 295	35,0	1 520	37,9	3 791	23,9
AB2	4 158	23,2	3 843	31,4	2 483	35,2	1 612	38,8	4 138	23,0
AA2	4 357	23,3	4 014	31,4	2 595	35,1	1 690	38,5	4 335	23,9
moyenne	4 100	23,3	3 792	31,4	2 458	35,1	1 607	38,4	4 088	23,6
écart type	291	0,1	252	0,1	152	0,1	85	0,5	275	0,5
% CV	7,1	0,4	6,7	0,2	6,2	0,3	5,3	1,2	6,7	2,1

Température = 20°C

Poutres	30 Hz		10 Hz		3 Hz		1 Hz		30 Hz (reprise)	
	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)
AB3	2 629	31,7	2 154	37,7	1 300	41,3	802	43,7	2 589	32,1
AB2	2 770	30,7	2 287	37,2	1 401	40,6	871	43,2	2 740	31,5
AA2	2 991	31,0	2 394	37,3	1 458	40,6	892	43,6	2 948	31,3
moyenne	2 797	31,1	2 278	37,4	1 387	40,8	855	43,5	2 665	31,6
écart type	183	0,5	120	0,3	80	0,4	47	0,3	107	0,4
% CV	6,5	1,7	5,3	0,9	5,8	0,9	5,5	0,6	4,0	1,3

GB-20 ORDINAIRE

Température = 30°C

Température = 30°C																						
Poutres	50 cycles			½ So							Rupture							S ₀ S _r /S ₀ S ₀ /S ₅₀ S _r /S ₅₀ S _x /S ₀				
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _½	ε _½	ε _½ /ε ₅₀	S _½ (MPa)	S _½ /S ₅₀ (%)	φ _½ (deg)	φ _½ /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S ₀ (MPa)	S _r /S ₀ (%)	S ₀ /S ₅₀	S _x /S ₀	
W2	778	726	58,7	35 000	751	0,97	363	50,0	61,6	1,05	48 000	753	0,97	276	38,0	62,2	1,06	559	49,4	77,0	64,9	
X2	732	813	58,2	40 000	761	1,04	407	50,1	61,7	1,06	44 000	758	1,04	306	37,6	61,4	1,05	638	48,0	78,5	63,8	
Y1	729	728	57,5	48 000	745	1,02	367	50,4	60,8	1,06	53 000	745	1,02	261	35,9	60,3	1,05	549	47,5	75,4	66,8	
Y2	441	876	55,1	150 000	440	1,00	432	49,3	56,8	1,03	150 000	440	1,00	432	49,3	56,8	1,03	713	60,6	81,4	60,6	
Z1	441	943	54,3	110 000	440	1,00	518	54,9	57,6	1,06	110 000	440	1,00	518	54,9	57,6	1,06	766	67,6	81,2	67,6	
Z2	434	977	54,8	150 000	437	1,01	484	49,5	58,3	1,06	160 000	436	1,00	417	42,7	58,0	1,06	735	56,7	75,2	65,9	
moy	844	56,4				1,00	429	50,7	59,5	1,05				1,00	368	43,1	59,4	1,05	660	55,0	78,1	64,9
écart	107	1,9				0,03	63	2,1	2,2	0,01				0,02	103	7,6	2,2	0,01	92	8,1	2,7	2,5
CV	12,6	3,4				2,5	14,6	4,2	3,6	1,2				2,3	27,9	17,6	3,7	1,1	14,0	14,8	3,5	3,9

GB-20 ORDINAIRE

Température = 20°C

Température = 20°C																						
Poutres	50 cycles			½ So								Rupture								S ₀ S _r /S ₀ S ₀ /S ₅₀ S _r /S ₅₀ S _x /S ₀		
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _r	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S ₀ (MPa)	S _r /S ₀ (%)	S ₀ /S ₅₀	S _x /S ₀	
H1	603	2 798	42,7	21 000	613	1,02	1 411	50,4	47,8	1,12	46 000	618	1,02	650	23,2	50,7	1,19	1 862	34,9	66,5	75,8	
I1	586	2 845	43,1	27 000	583	0,99	1 427	50,2	47,7	1,11	130 000	605	1,03	480	16,9	48,4	1,12	1 594	30,1	58,0	89,5	
G1	576	2 442	42,4	54 000	548	0,95	1 227	50,2	47,5	1,12	110 000	577	1,00	441	18,1	48,2	1,14	1 675	26,3	68,6	73,3	
G2	371	2 699	40,1	120 000	376	1,01	1 321	48,9	45,5	1,13	130 000	382	1,03	1 156	42,8	46,3	1,15	2 044	56,6	75,7	64,6	
H2	371	3 121	40,5	260 000	365	0,98	1 547	49,6	45,0	1,11	440 000	383	1,03	841	26,9	46,0	1,14	2 128	39,5	68,2	72,7	
I2	366	2 816	40,0	320 000	374	1,02	1 407	50,0	46,0	1,15	410 000	377	1,03	699	24,8	48,0	1,20	2 119	33,0	75,2	66,4	
moy	2 787	41,5				1,00	1 390	49,9	46,6	1,12				1,03	711	25,5	47,9	1,16	1 904	36,7	68,4	73,7
écart	220	1,4				0,03	108	0,5	1,2	0,02				0,01	263	9,4	1,7	0,03	231	10,7	7,2	8,8
CV	7,9	3,4				2,7	7,8	1,1	2,6	1,4				1,2	36,9	36,8	3,5	2,7	12,1	29,1	10,5	12,0

GB-20 ORDINAIRE

Température = 15°C

Température = 15°C																						
Poutres	50 cycles			½ So							Rupture							S ₀ S _r /S ₀ S ₀ /S ₅₀ S _r /S ₅₀				
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _r	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S ₀ (MPa)	S _r /S ₀ (%)	S ₀ /S ₅₀	S _r /S ₅₀	
M1	475	4 546	32,8	20 000	481	1,01	2 297	50,5	38,0	1,16	22 000	479	1,01	2 139	47,1	38,0	1,16	3 719	57,5	81,8	61,8	
K1	469	4 390	33,5	38 000	480	1,02	2 182	49,7	38,4	1,15	59 000	486	1,04	1 123	25,6	38,6	1,15	3 469	32,4	79,0	62,9	
L1	465	4 464	33,8	22 000	477	1,03	2 258	50,6	39,0	1,15	32 000	476	1,02	1 341	30,0	40,6	1,20	3 617	37,1	81,0	62,4	
U1	268	4 797	31,5	320 000	260	0,97	2 412	50,3	35,7	1,13	630 000	280	1,04	949	19,8	36,6	1,16	3 623	26,2	75,5	68,6	
M2	262	4 876	30,7	470 000	250	0,95	2 447	50,2	34,9	1,14	830 000	269	1,03	1 195	24,5	36,5	1,19	3 536	33,8	72,5	69,2	
K2	261	4 936	31,6	340 000	260	1,00	2 429	49,2	34,5	1,09	700 000	278	1,07	1 116	22,6	36,7	1,16	3 295	33,9	66,8	73,7	
moy	4 668	32,3				1,00	2 338	50,1	36,8	1,14				1,03	1 311	28,3	37,8	1,17	3 543	36,8	76,1	66,1
écart	230	1,2				0,03	108	0,5	1,9	0,02				0,02	425	9,8	1,6	0,02	148	10,8	5,8	4,7
CV	4,9	3,8				3,0	4,6	1,1	5,3	2,1				1,9	32,5	34,7	4,2	1,7	4,2	29,2	7,6	7,1

GB-20 ORDINAIRE

Température = 10°C

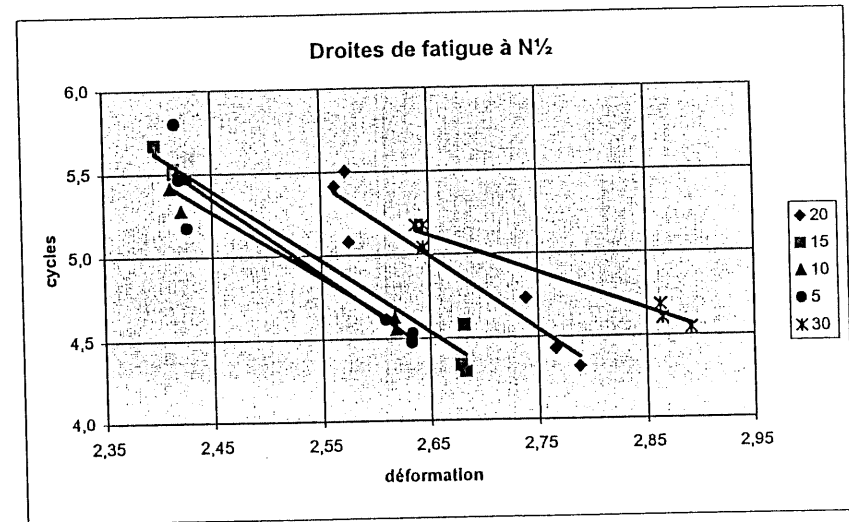
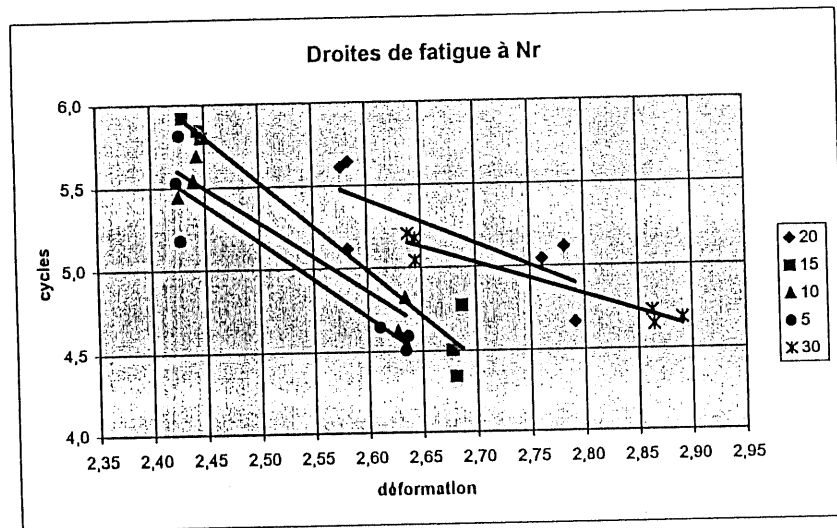
Température = 10°C																						
Poutres	50 cycles			½ So							Rupture							S ₀ S _r /S ₀ S ₀ /S ₅₀ S _r /S ₅₀				
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _r	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S ₀ (MPa)	S _r /S ₀ (%)	S ₀ /S ₅₀	S _r /S ₅₀	
O1	402	7 400	24,6	36 000	415	1,03	3 750	50,7	28,9	1,17	42 000	424	1,05	2 352	31,8	30,0	1,22	6 539	36,0	88,4	57,3	
P1	401	7 016	24,7	42 000	414	1,03	3 490	49,7	27,7	1,12	66 000	431	1,07	1 877	26,8	28,0	1,13	5 777	32,5	82,3	60,4	
N2	258	7 637	22,3	300 000	267	1,03	3 820	50,0	26,3	1,18	490 000	277	1,07	1 942	25,4	26,9	1,21	6 115	31,8	80,1	62,5	
P2	258	7 098	18,7	190 000	264	1,02	3 543	49,9	23,5	1,26	350 000	275	1,07	1 777	25,0	25,4	1,36	5 795	30,7	81,6	61,1	
O2	247	8 228	22,4	260 000	258	1,04	4 165	50,6	26,8	1,20	280 000	266	1,08	3 268	39,7	27,7	1,24	6 760	40,3	82,2	61,6	
moy		7 476	22,5			1,03	3 754	50,2	26,6	1,19				1,07	2 243	29,7	27,6	1,23	6 197	35,8	82,9	60,6
écart		488	2,4			0,01	268	0,4	2,0	0,05				0,01	613	8,2	1,7	0,08	441	7,3	3,2	2,0
CV		6,5	10,8			0,7	7,1	0,8	7,6	4,1				0,9	27,3	20,8	6,1	6,6	7,1	20,3	3,8	3,2

GB-20 ORDINAIRE

Température = 5°C

Température = 5°C																						
Poutres	50 cycles			½ S ₀							Rupture							S ₀ S _r /S ₀ S ₀ /S ₅₀ S _r /S ₅₀				
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _r	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S ₀ (MPa)	S _r /S ₀ (%)	S ₀ /S ₅₀	S _r /S ₅₀	
T1	418	8 423	14,9	30 000	429	1,03	4 331	51,4	19,7	1,32	32 000	431	1,03	3 137	37,2	19,0	1,28	8 084	38,8	96,0	53,6	
R2	417	8 377	15,0	34 000	430	1,03	4 105	49,0	19,7	1,31	39 000	433	1,04	3 124	37,3	19,7	1,31	7 740	40,4	92,4	53,0	
Q1	403	8 519	14,7	41 000	406	1,01	4 218	49,5	19,5	1,33	44 000	408	1,01	3 606	42,3	20,1	1,37	8 186	44,1	96,1	51,5	
T2	264	9 001	13,5	150 000	267	1,01	4 578	50,9	17,2	1,27	150 000	267	1,01	4 578	50,9	17,2	1,27	8 594	53,3	95,5	53,3	
S1	259	8 744	14,1	290 000	263	1,02	4 404	50,4	16,4	1,16	340 000	265	1,02	2 773	31,7	12,8	0,91	9 118	30,4	104,3	48,3	
Q2	255	8 279	14,0	630 000	261	1,02	3 976	48,0	18,0	1,29	650 000	267	1,05	2 839	34,3	17,2	1,23	8 201	34,6	99,1	48,5	
moy	8 557	14,4				1,02	4 269	49,9	18,4	1,28				1,03	3 343	39,0	17,7	1,23	8 321	40,3	97,2	51,4
écart	269	0,6				0,01	216	1,3	1,4	0,06				0,01	673	6,8	2,7	0,16	477	7,9	4,1	2,4
CV	3,1	4,1				0,9	5,1	2,5	7,8	4,8				1,4	20,1	17,5	15,2	13,3	5,7	19,7	4,2	4,7

Enrobé GB-20 avec bitume conventionnel



Droites de fatigue à Nr

Température	Pente	Ordonnée	$\sigma(Nr)^*$	ϵ_6	$\sigma(N_6)$
5	-4,59	16,63	0,228	208	0,312
10	-4,22	15,82	0,159	214	0,222
15	-5,43	19,11	0,167	259	0,199
20	-2,69	12,40	0,259	240	0,424
30	-1,96	10,32	0,064	160	0,142
Moyenne	-3,78	-4,23	0,176		
Écart	1,421	1,148	0,075		

* $\sigma(N_{1/2})$ SHRP = 0,390

Droites de fatigue à N½

Température	Pente	Ordonnée	$\sigma(N_{1/2})^*$	ϵ_6	$\sigma(N_6)$
5	-4,65	16,74	0,206	204	0,283
10	-4,04	15,16	0,093	186	0,142
15	-4,29	15,90	0,113	204	0,146
20	-4,43	16,72	0,169	264	0,251
30	-2,24	11,04	0,071	179	0,146
Moyenne	-3,93	-4,35	0,130		
Écart	0,972	0,256	0,056		

Enrobé GB-20 avec bitume polymère

GB-20 polymère

Température = 30°C

Température = 30°C																						
Poutres	50 cycles			1/2 S ₀							Rupture								S ₀			
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _{ix}	ε _{ix} (μm/m)	ε _{ix} /ε ₅₀	S _{ix} (MPa)	S _{ix} /S ₅₀	φ _{ix} (deg)	φ _{ix} /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀					
Y1	1583	412	59,5	160 000	1572	0,99	204	49,5	65,5	1,10	250 000	1568	0,99	161	39,1	66,9	1,12	248	64,9	60,2	82,3	
X2	1554	395	61,4	76 000	1534	0,99	198	50,1	68,6	1,12	110 000	1532	0,99	158	40,0	70,5	1,15	259	61,0	65,6	76,4	
X1	1160	407	61,2	230 000	1146	0,99	203	49,9	66,0	1,08	480 000	1139	0,98	108	26,5	67,7	1,11	242	44,6	59,5	83,9	
W2	1145	412	60,0	320 000	1120	0,98	207	50,2	66,1	1,10	370 000	1117	0,98	168	40,8	66,7	1,11	256	65,6	62,1	80,9	
Z1	1139	415	61,0	230 000	1119	0,98	213	51,3	66,0	1,08	290 000	1110	0,97	126	30,4	68,7	1,13	272	46,3	65,5	78,3	
moy	408	60,6				0,99	205	50,2	66,4	1,10		0,98	144	35,4	68,1	1,12	255	56,5	62,6	80,4		
écart	8	0,8				0,01	6	0,7	1,2	0,02		0,01	26	6,5	1,6	0,02	11	10,2	2,9	3,0		
CV	1,9	1,4				0,6	2,7	1,4	1,9	1,5		0,7	18,0	18,3	2,3	1,4	4,5	18,1	4,6	3,7		

GB-20 polymère

Température = 20°C

Température = 20°C																						
Poutres	50 cycles			½ So							Rupture							So				
	ϵ_{50} ($\mu\text{m/m}$)	S_{50} (MPa)	ϕ_{50} (deg)	N_x	ϵ_x ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_x/ϵ_{50}	S_x (MPa)	S_x/S_{50}	ϕ_x (deg)	ϕ_x/ϕ_{50}	N_r (rupture)	ϵ_r ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_r/ϵ_{50}	S_r (MPa)	S_r/S_{50}	ϕ_r (deg)	ϕ_r/ϕ_{50}	S_o (MPa)	S_r/S_o	S_r/S_{50}	S_x/S_o	
C2	1197	1163	49,8	28 000	1184	0,99	582	50,0	55,1	1,11	80 000	1198	1,00	269	23,1	59,1	1,19	711	37,8	61,1	81,9	
J1	1161	1548	48,6	36 000	1152	0,99	771	49,8	54,3	1,12	86 000	1144	0,99	417	28,9	54,7	1,13	930	44,8	60,1	82,9	
V1	1158	1453	50,1	32 000	1158	1,00	725	49,9	55,4	1,11	110 000	1147	0,99	453	31,2	57,6	1,15	823	55,0	56,8	88,1	
I2	763	1694	46,6	460 000	736	0,96	847	50,0	50,8	1,09	630 000	760	1,00	500	29,5	50,2	1,08	1042	48,0	61,5	81,3	
J2	755	1597	46,7	410 000	746	0,99	783	49,0	51,6	1,10	510 000	747	0,99	638	39,9	51,3	1,10	1055	60,5	66,1	74,2	
K2	729	1649	46,8	290 000	722	0,99	815	49,4	51,2	1,09	390 000	705	0,97	541	32,8	47,9	1,02	1100	49,2	66,7	74,1	
moy	1517	48,1			0,99		754	49,7	53,1	1,10		0,99		470	30,8	53,5	1,11	944	49,2	62,0	80,4	
écart	193	1,6			0,01		94	0,4	2,1	0,01		0,01		125	5,7	4,4	0,06	152	7,9	3,8	5,4	
CV	12,7	3,3			1,2		12,4	0,8	3,9	0,9		1,2		26,5	18,7	8,2	5,3	16,1	16,0	6,1	6,7	

GB-20 polymère

Température = 15°C

Température = 15°C																							
Poutres	50 cycles			½ So								Rupture								So			
	ϵ_{50} (µm/m)	S_{50} (MPa)	ϕ_{50} (deg)	N_x	ϵ_x (µm/m)	ϵ_x/ϵ_{50}	S_x (MPa)	S_x/S_{50}	ϕ_x (deg)	ϕ_x/ϕ_{50}	N_r (rupture)	ϵ_r (µm/m)	ϵ_r/ϵ_{50}	S_r (MPa)	S_r/S_{50}	ϕ_r (deg)	ϕ_r/ϕ_{50}	S_o (MPa)	S_r/S_o	S_r/S_{50}	S_x/S_o		
M2	951	2 457	41,8	27 000	964	1,01	1 233	50,2	48,0	1,15	88 000	965	1,01	496	20,2	51,8	1,25	1 481	33,5	60,3	83,3		
N1	945	2 660	42,3	33 000	947	1,00	1 334	50,2	48,3	1,14	110 000	931	0,99	803	30,2	48,5	1,15	1 538	52,2	57,8	86,7		
L2	936	2 959	41,9	20 000	945	1,01	1 482	50,1	48,5	1,16	53 000	935	1,00	651	22,0	51,3	1,22	1 832	35,5	61,9	80,9		
M1	667	2 623	38,1	170 000	673	1,01	1 320	50,3	44,8	1,18	410 000	672	1,01	619	23,6	45,0	1,18	1 720	36,0	65,6	76,7		
U2	653	2 364	40,8	110 000	654	1,00	1 154	48,8	45,6	1,12	130 000	642	0,98	979	41,4	44,9	1,10	1 606	61,0	67,9	71,9		
U1	632	2 400	42,2	300 000	654	1,03	1 202	50,1	46,8	1,11	1 200 000	645	1,02	309	12,9	42,6	1,01	1 341	23,0	55,9	89,6		
moy	2 577	41,2			1,01		1 288	49,9	47,0	1,14		1,00		643	25,0	47,4	1,15	1 586	40,2	61,6	81,5		
écart	222	1,8			0,01		118	0,6	1,5	0,03		0,02		233	9,8	3,8	0,09	174	13,8	4,6	6,5		
CV	8,6	3,9			1,2		9,1	1,1	3,3	2,2		1,5		36,3	39,0	7,9	7,5	11,0	34,4	7,4	8,0		

GB-20 polymère

Température = 10°C

Température = 10°C																							
Poutres	50 cycles			½ So								Rupture								So			
	ϵ_{50} ($\mu\text{m/m}$)	S_{50} (MPa)	ϕ_{50} (deg)	N_x	ϵ_x ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_x/ϵ_{50}	S_x (MPa)	S_x/S_{50}	ϕ_x (deg)	ϕ_x/ϕ_{50}	N_r (rupture)	ϵ_r ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_r/ϵ_{50}	S_r (MPa)	S_r/S_{50}	ϕ_r (deg)	ϕ_r/ϕ_{50}	S_o (MPa)	S_r/S_o	S_r/S_{50}	S_x/S_o		
Q1	838	4 155	33,0	21 000	849	1,01	2 067	49,7	40,1	1,22	56 000	865	1,03	825	19,9	42,5	1,29	2 660	31,0	64,0	77,7		
P1	812	4 012	34,5	12 000	833	1,03	2 021	50,4	41,9	1,21	18 000	848	1,04	1 505	37,5	43,5	1,26	3 000	50,2	74,8	67,4		
R1	809	3 697	32,1	26 000	817	1,01	1 858	50,3	37,9	1,18	89 000	829	1,02	552	14,9	42,0	1,31	2 177	25,4	58,9	85,3		
P2	517	4 426	30,5	310 000	522	1,01	2 230	50,4	36,8	1,21	580 000	531	1,03	939	21,2	38,2	1,25	3 069	30,6	69,3	72,7		
R2	505	4 780	32,2	89 000	518	1,03	2 382	49,8	38,0	1,18	110 000	524	1,04	1 546	32,3	38,0	1,18	3 743	41,3	78,3	63,6		
Q2	501	4 678	31,5	130 000	509	1,02	2 322	49,6	37,0	1,17	240 000	512	1,02	1 287	27,5	38,4	1,22	3 327	38,7	71,1	69,8		
moy		4 291	32,3			1,02	2 147	50,0	38,6	1,20			1,03	1 109	25,6	40,4	1,25	2 996	36,2	69,4	72,8		
écart		414	1,4			0,01	199	0,3	2,0	0,02			0,01	400	8,5	2,5	0,05	540	9,0	7,1	7,8		
CV		9,6	4,2			0,7	9,3	0,7	5,2	1,6			0,8	36,1	33,1	6,2	3,7	18,0	24,8	10,2	10,7		

GB-20 polymère

Température = 5°C

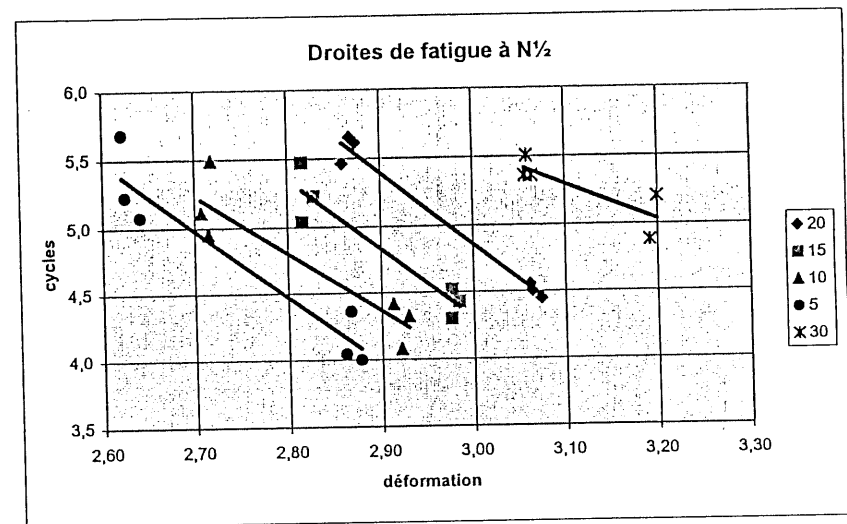
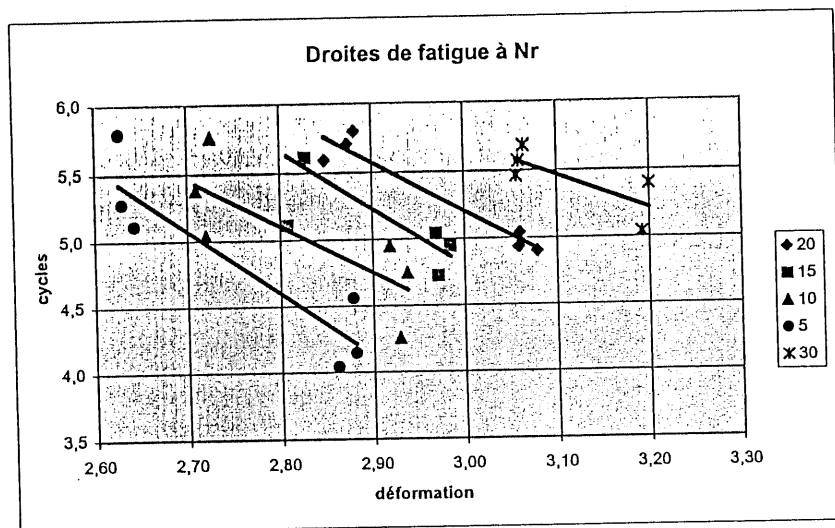
Température = 5°C																						
Poutres	50 cycles			N _x	½ S ₀						Rupture								S ₀			
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)		ε _x (μm/m)	ε _x /ε ₅₀	S _x (MPa)	S _x /S ₅₀	φ _x (deg)	φ _x /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S ₀ (MPa)	S _r /S ₀	S _r /S ₅₀	S _x /S ₀	
T1	732	5 332	22,9	10 000	753	1,03	2 687	50,4	29,4	1,28	14 000	759	1,04	1 926	36,1	30,0	1,31	4 631	41,6	86,9	58,0	
O1	727	6 428	22,8	23 000	735	1,01	3 244	50,5	31,3	1,37	36 000	755	1,04	1 898	29,5	32,1	1,41	5 002	37,9	77,8	64,9	
S2	708	6 590	22,5	11 000	726	1,03	3 291	49,9	30,2	1,34	11 000	726	1,03	3 291	49,9	30,2	1,34	5 659	58,2	85,9	58,2	
V2	425	6 644	20,5	120 000	437	1,03	3 296	49,6	28,1	1,37	130 000	439	1,03	2 550	38,4	28,8	1,40	5 860	43,5	88,2	56,2	
S1	412	6 427	21,3	480 000	418	1,01	3 230	50,3	27,5	1,29	620 000	423	1,03	2 284	35,5	28,4	1,33	5 395	42,3	83,9	59,9	
O2	411	6 831	20,7	170 000	421	1,02	3 417	50,0	27,4	1,32	190 000	426	1,04	2 588	37,9	27,8	1,34	6 073	42,6	88,9	56,3	
moy	6375	21,8			1,02		3 194	50,1	29,0	1,33		1,03		2 423	37,9	29,6	1,36	5 437	44,4	85,3	58,9	
écart	533	1,1			0,01		257	0,3	1,6	0,04		0,01		517	6,7	1,6	0,04	543	7,0	4,0	3,2	
CV	8,4	5,0			0,7		8,0	0,6	5,5	2,9		0,5		21,4	17,7	5,3	3,0	10,0	15,8	4,7	5,5	

GB-20 polymère

Etude de température

Poutres	T (°C)	50 cycles		
---------	-----------	-----------	--	--

Enrobé GB-20 avec bitume polymère



Droites de fatigue à N_r

Température	Pente	Ordonnée	$\sigma(N_{1/2})^*$	ϵ_6	$\sigma(N_6)$
5	-4,77	17,96	0,313	321	0,428
10	-3,52	14,97	0,361	351	0,550
15	-4,29	17,66	0,367	525	0,513
20	-3,64	16,13	0,124	606	0,151
30	-2,36	12,76	0,185	732	0,217
Moyenne	-3,72	-4,06	0,270		
Écart	0,911	0,583	0,110		

* $\sigma(N_{1/2})$ SHRP = 0,390

Droites de fatigue à $N_{1/2}$

Température	Pente	Ordonnée	$\sigma(N_{1/2})^*$	ϵ_6	$\sigma(N_6)$
5	-5,05	18,60	0,236	314	0,325
10	-4,37	17,04	0,237	336	0,373
15	-5,22	19,97	0,176	474	0,276
20	-5,34	20,87	0,096	611	0,122
30	-2,58	13,27	0,156	664	0,194
Moyenne	-4,51	-4,99	0,180		
Écart	1,144	0,433	0,059		

ANNEXE V

Formulation des enrobés MB-16 de l'autoroute 10.

Caractérisation d'un enrobé MB-16 à 15°C

Bitume 80/100

Poutres	30 Hz		10 Hz		3 Hz		1 Hz		30 Hz (reprise)	
	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)
G1	7 854	11,0	9 402	20,5	6 919	24,2	5 063	28,5	7 712	11,0
G2	7 849	8,7	9 633	18,1	7 107	22,6	5 262	27,3	7 817	9,3
H1	8 286	6,9	9 307	18,6	7 078	23,0	5 288	27,8	8 248	5,9
moyenne	7 996	8,8	9 447	19,1	7 035	23,2	5 204	27,9	7 926	8,7
écart type	251	2,0	167	1,3	101	0,9	123	0,6	284	2,6
% CV	3,1	23,1	1,8	6,8	1,4	3,7	2,4	2,0	3,6	29,8

Bitume MG 90

Poutres	30 Hz		10 Hz		3 Hz		1 Hz		30 Hz (reprise)	
	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)
A1	6 640	13,6	7 569	22,8	5 490	25,7	3 995	29,0	6 607	14,0
B1	6 501	12,2	6 497	21,7	4 828	24,8	3 565	27,8	6 482	12,8
C1	6 319	14,2	7 012	23,0	5 013	26,1	3 640	29,2	6 266	15,0
moyenne	6 486	13,3	7 026	22,5	5 111	25,2	3 733	28,7	6 452	13,9
écart type	161	1,0	536	0,7	342	0,6	230	0,7	173	1,1
% CV	2,5	7,7	7,6	3,1	6,7	2,4	6,2	2,6	2,7	8,1

Bitume 150/200

Poutres	30 Hz		10 Hz		3 Hz		1 Hz		30 Hz (reprise)	
	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)
E1	6 781	15,9	7 196	27,0	4 961	30,8	3 384	35,5	6 841	16,4
F1	6 924	15,3	7 364	27,3	4 910	32,2	3 269	37,5	6 914	17,5
G1	6 284	13,0	6 315	25,4	4 336	30,8	2 931	36,1	6 224	12,3
moyenne	6 663	14,7	6 959	27,2	4 736	31,2	3 195	36,4	6 660	15,4
écart type	336	1,5	563	0,2	347	0,8	236	1,0	379	2,7
% CV	5,0	10,4	8,1	0,8	7,3	2,6	7,4	2,9	5,7	17,6

Bitume MG 175

Poutres	30 Hz		10 Hz		3 Hz		1 Hz		30 Hz (reprise)	
	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)
E1	5 264	20,0	5 181	29,2	3 496	31,5	2 381	34,1	5 214	21,9
F1	5 397	19,6	5 408	29,5	3 655	31,6	2 490	34,2	5 405	21,3
H1	5 063	18,3	4 849	28,3	3 281	31,8	2 242	35,0	4 961	19,0
moyenne	5 241	19,3	5 146	29,3	3 477	31,6	2 371	34,5	5 310	20,7
écart type	168	0,9	281	0,2	188	0,2	124	0,5	135	1,5
% CV	3,2	4,7	5,5	0,6	5,4	0,5	5,2	1,4	2,5	7,3

Caractérisation d'un enrobé MB-16 à 5°C

Bitume 80/100

Poutres	30 Hz		10 Hz		3 Hz		1 Hz		30 Hz (reprise)	
	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)
G1	14 045	7,5	13 123	9,0	11 627	10,9	10 131	13,0	14 017	7,4
G2	14 245	6,9	13 380	8,6	11 855	10,6	10 376	12,8	14 211	6,8
H1	14 683	7,1	13 763	8,8	12 215	10,8	10 672	13,2	14 779	7,2
moyenne	14 325	7,2	13 422	8,8	11 899	10,8	10 393	13,0	14 336	7,1
écart type	327	0,3	322	0,2	297	0,1	271	0,2	396	0,3
% CV	2,3	4,4	2,4	2,5	2,5	1,3	2,6	1,5	2,8	3,7

Bitume MG 90

Poutres	30 Hz		10 Hz		3 Hz		1 Hz		30 Hz (reprise)	
	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)
A1	12 929	9,1	11 792	10,8	10 165	13,0	8 678	15,1	12 849	9,3
B1	11 899	9,9	10 908	11,6	9 327	13,9	7 893	16,1	11 933	9,9
C1	12 060	10,3	11 019	12,2	9 358	14,4	7 863	16,9	12 071	10,4
moyenne	12 296	9,8	11 240	11,5	9 617	13,4	8 145	16,0	12 284	9,9
écart type	554	0,6	482	0,7	475	0,6	462	0,9	494	0,6
% CV	4,5	5,9	4,3	5,9	4,9	4,4	5,7	5,7	4,0	5,7

Bitume 150/200

Poutres	30 Hz		10 Hz		3 Hz		1 Hz		30 Hz (reprise)	
	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)
E1	13 038	9,7	11 864	11,8	10 094	14,7	8 418	18,0	13 107	9,6
F1	13 363	9,5	12 246	11,8	10 371	14,9	8 620	18,4	13 516	9,6
G1	12 059	9,8	10 988	12,2	9 264	15,2	7 673	18,6	12 178	9,7
moyenne	12 820	9,6	11 699	11,8	9 910	14,9	8 237	18,3	12 933	9,6
écart type	679	0,1	645	0,0	576	0,2	499	0,3	686	0,1
% CV	5,3	1,5	5,5	0,2	5,8	1,6	6,1	1,5	5,3	0,7

Bitume MG 175

Poutres	30 Hz		10 Hz		3 Hz		1 Hz		30 Hz (reprise)	
	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)	E (MPa)	ϕ (deg)
A1	9 418	13,2	8 306	15,8	6 687	19,0	5 255	22,1	9 371	13,5
B1	11 256	12,6	9 950	14,5	8 150	17,5	6 561	20,5	11 219	12,5
C1	11 599	11,5	10 484	13,8	8 688	16,7	7 098	19,5	11 615	11,7
moyenne	10 758	12,4	9 580	15,2	7 841	17,7	6 305	20,7	10 295	12,5
écart type	1 173	0,9	1 135	0,9	1 036	1,2	947	1,3	1 307	0,9
% CV	10,9	6,8	11,9	6,0	13,2	6,6	15,0	6,4	12,7	7,3

MB-16 80/100

Température = 5°C

Poutres	50 cycles			1/2 So						Rupture								S ₀ S ₁ /S ₀ S ₀ /S ₅₀ S ₁ /S ₅₀			
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _{1/2}	ε _{1/2} (μm/m)	ε _{1/2} /ε ₅₀	S _{1/2} (MPa)	S _{1/2} /S ₅₀ (%)	φ _{1/2} (deg)	φ _{1/2} /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S ₀ (MPa)	S ₁ /S ₀ (%)	S ₀ /S ₅₀	S ₁ /S ₅₀
F2	339	13 049	8,1	350 000	371	1,09	6 541	50,1	15,3	1,89	390 000	379	1,12	4 429	33,9	16,0	1,98	12 853	34,5	98,5	50,9
D2	355	11 414	10,4	360 000	366	1,03	5 785	50,7	15,6	1,50	370 000	369	1,04	4 921	43,1	16,1	1,55	11 430	43,1	100,1	50,6
E2	357	13 034	10,3	120 000	366	1,03	6 869	52,7	14,9	1,45	120 000	366	1,03	6 870	52,7	15,0	1,46	13 349	51,5	102,4	51,5
F1	486	12 465	11,1	69 000	505	1,04	6 272	50,3	16,6	1,50	82 000	514	1,06	4 928	39,5	17,2	1,55	11 615	42,4	93,2	54,0
D1	499	11 687	10,0	28 000	538	1,08	6 005	51,4	15,6	1,56	28 000	538	1,08	6 005	51,4	15,7	1,57	11 620	51,7	99,4	51,7
moy	12 330	10,0			1,05	6 294	51,0	15,6	1,58				1,06	5 431	44,1	16,0	1,62	12 173	44,6	98,7	51,7
écart	756	1,1			0,03	429	1,0	0,6	0,18				0,04	990	7,9	0,8	0,20	868	7,2	3,4	1,3
cv	6,1	11,3			2,9	6,8	2,0	4,0	11,3				3,4	18,2	18,0	5,0	12,6	7,1	16,1	3,5	2,6

MB-16 MG-90

Température = 5°C

Poutres	50 cycles			1/2 So						Rupture								S ₀ S ₁ /S ₀ S ₀ /S ₅₀ S ₁ /S ₅₀			
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _{1/2}	ε _{1/2} (μm/m)	ε _{1/2} /ε ₅₀	S _{1/2} (MPa)	S _{1/2} /S ₅₀ (%)	φ _{1/2} (deg)	φ _{1/2} /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S ₀ (MPa)	S ₁ /S ₀ (%)	S ₀ /S ₅₀	S ₁ /S ₅₀
H1	406	9 717	14,0	190 000	429	1,06	4 642	47,8	21,8	1,56	180 000	425	1,05	5 418	55,8	20,6	1,47	8 949	60,5	92,1	51,9
I2	409	10 107	12,3	330 000	418	1,02	5 343	52,9	20,4	1,66	340 000	422	1,03	4 538	44,9	20,9	1,70	9 104	49,8	90,1	58,7
G1	410	10 077	14,0	330 000	419	1,02	5 087	50,5	20,8	1,49	330 000	419	1,02	5 087	50,5	20,8	1,49	9 102	55,9	90,3	55,9
I1	548	10 294	14,3	45 000	573	1,05	5 206	50,6	21,3	1,49	65 000	583	1,06	2 613	25,4	19,2	1,34	9 464	27,6	91,9	55,0
G2	550	10 685	13,9	47 000	567	1,03	5 341	50,0	20,7	1,49	56 000	579	1,05	3 455	32,3	21,3	1,53	9 762	35,4	91,4	54,7
H2	550	9 641	14,3	34 000	575	1,05	4 995	51,8	21,9	1,53	36 000	571	1,04	3 964	41,1	23,3	1,63	8 670	45,7	89,9	57,6
moy	10 087	13,8			1,04	5 102	50,6	21,2	1,54				1,04	4 179	41,7	21,0	1,53	9 175	45,8	91,0	55,6
écart	384	0,8			0,01	264	1,7	0,6	0,07				0,02	1 050	11,3	1,3	0,13	331	5,7	1,0	2,4
cv	3,8	5,5			1,4	5,2	3,4	2,9	4,4				1,4	25,1	27,1	6,3	8,2	4,2	27,2	1,1	4,3

MB-16 150/200

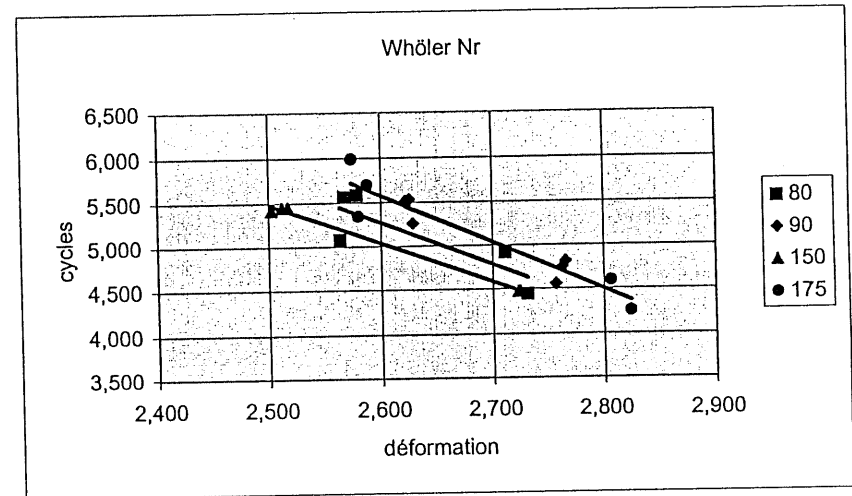
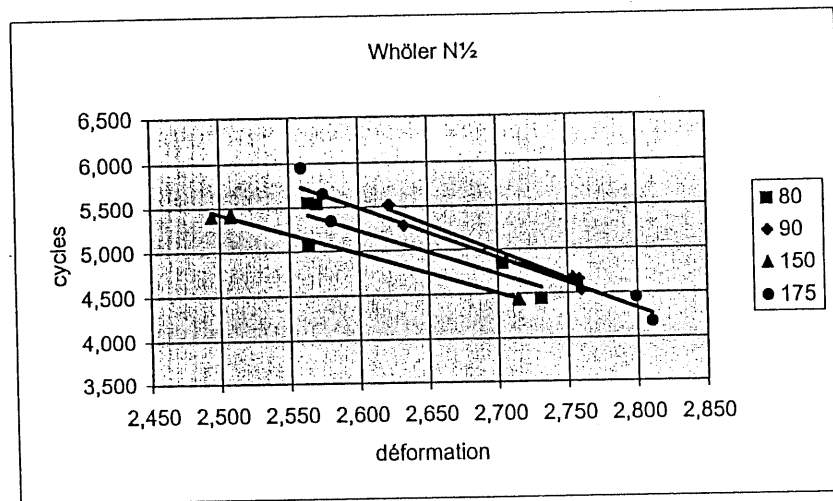
Température = 5°C

Poutres	50 cycles			1/2 So						Rupture								S ₀ S ₁ /S ₀ S ₀ /S ₅₀ S ₁ /S ₅₀			
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _{1/2}	ε _{1/2} (μm/m)	ε _{1/2} /ε ₅₀	S _{1/2} (MPa)	S _{1/2} /S ₅₀ (%)	φ _{1/2} (deg)	φ _{1/2} /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S ₀ (MPa)	S ₁ /S ₀ (%)	S ₀ /S ₅₀	S ₁ /S ₅₀
A2	305	11 178	13,3	250 000	312	1,02	5 986	53,6	19,3	1,45	260 000	318	1,04	5 026	45,0	20,2	1,52	10 356	48,5	92,6	57,8
A1	309	10 287	13,9	270 000	322	1,04	5 396	52,5	18,9	1,36	280 000	325	1,05	4 475	43,5	19,2	1,38	9 882	45,3	96,1	54,6
D2	310	10 790	14,0	250 000	322	1,04	5 477	50,8	18,4	1,31	280 000	329	1,06	3 599	33,4	18,4	1,31	10 766	33,4	99,8	50,9
D1	500	10 744	13,7	28 000	518	1,04	5 519	51,4	20,5	1,50	30 000	528	1,06	4 428	41,2	21,0	1,53	10 086	43,9	93,9	54,7
C1	501	10 675	14,4	27 000	519	1,04	5 451	51,1	20,6	1,43	30 000	530	1,06	4 420	41,4	21,1	1,47	10 245	43,1	96,0	53,2
moy	10 735	13,9			1,04	5 566	51,8	19,5	1,41				1,05	4 390	40,9	20,0	1,44	10 267	42,9	95,7	54,2
écart	318	0,4			0,01	239	1,2	1,0	0,07				0,01	510	4,5	1,2	0,09	331	5,7	2,7	2,5
cv	3,0	2,9			0,7	4,3	2,2	5,0	5,2				0,7	11,6	11,0	5,8	6,5	3,2	13,2	2,8	4,7

MB-16 MG-175

Température = 5°C

Poutres	50 cycles			1/2 So						Rupture								S ₀ S ₁ /S ₀ S ₀ /S ₅₀ S ₁ /S ₅₀			
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _{1/2}	ε _{1/2} (μm/m)	ε _{1/2} /ε ₅₀	S _{1/2} (MPa)	S _{1/2} /S ₅₀ (%)	φ _{1/2} (deg)	φ _{1/2} /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S ₀ (MPa)	S ₁ /S ₀ (%)	S ₀ /S ₅₀	S ₁ /S ₅₀
C2	355	9 146	16,3	890 000	362	1,02	4 590	50,2	23,8	1,46	970 000	375	1,06	3 090	33,8	23,5	1,44	7 851	39,4	85,8	58,5
B2	359	9 337	17,2	220 000	380	1,06	4 773	51,1	24,9	1,45	220 000	380	1,06	4 774	51,1	24,9	1,45	8 507	56,1	91,1	56,1
D1	370	8 722	17,6	450 000	375	1,01	4 400	50,4	25,1	1,43	500 000	387	1,05	2 981	34,2	25,2	1,43	7 682	38,8	88,1	57,3
B1	603	8 533	19,1	28 000	629	1,04	4 266	50,0	27,6	1,45	39 000	640	1,06	2 464	28,9	28,0	1,47	7 434	33,1	87,1	57,4
A2	617	7 875	19,8	15 000	646	1,05	3 970	50,4	28,4	1,43	18 000	667	1,08	2 781	35,3	29,9	1,51	6 853	40,6	87,0	57,9
moy	8 723	18,0			1,04	4 400	50,4	26,0	1,44				1,06	3 218	36,7	26,3	1,46	7 665	41,6	87,8	57,4
écart	573	1,4			0,02	307	0,4	1,9	0,01				0,01	902	8,5	2,6	0,03	603	8,6	2,0	0,9
cv	6,6	7,9			1,8	7,0	0,8	7,5	0,9				1,2	28,0	23,1	9,9	2,1	7,9	20,7	2,3	1,5



Droites de fatigue à N½

Bitume	Pente	Ordonnée	$\sigma(Nr)^*$	ϵ_6	$\sigma(N_6)$
80	-5,04	18,32	0,252	279	0,386
90	-6,27	21,91	0,083	344	0,120
150	-4,57	16,86	0,040	236	0,058
175	-5,82	20,61	0,216	325	0,269
Moyenne	-5,43				
Écart	0,763	-14,072			

* $\sigma(N_{1/2})$ SHRP = 0,390

Droites de fatigue à Nr

Bitume	Pente	Ordonnée	$\sigma(N_{1/2})^*$	ϵ_6	$\sigma(N_6)$
80	-4,84	17,84	0,300	281	0,464
90	-5,32	19,40	0,150	330	0,226
150	-4,49	16,71	0,042	243	0,060
175	-5,39	19,59	0,272	332	0,339
Moyenne	-5,01				
Écart	0,424	-8,468			

Enrobé MB-16 à 15°C

MB-16 80/100

Température = 15°C

Température =15°C																						
Poutres	50 cycles			N _{1/2}	1/2 So						Rupture								S ₀ S _r /S ₀ S ₀ /S ₅₀ S _r /S ₀			
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)		ε _{1/2} (μm/m)	ε _{1/2} /ε ₅₀	S _{1/2} (MPa)	S _{1/2} /S ₅₀ (%)	φ _{1/2} (deg)	φ _{1/2} /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S ₀ (MPa)	S _r /S ₀ (%)	S ₀ /S ₅₀	S _r /S ₀	
G1	560	8 073	25,0	20 000	567	1,01	3 925	48,6	32,3	1,29	37 000	583	1,04	2 465	30,5	32,7	1,31	5 936	41,5	73,5	66,1	
H1	549	7 894	26,3	20 000	561	1,02	3 903	49,4	32,9	1,25	58 000	572	1,04	696	8,8	29,2	1,11	5 753	12,1	72,9	67,8	
G2	356	8 507	23,4	89 000	366	1,03	4 519	53,1	29,5	1,26	99 000	372	1,04	4 011	47,1	30,0	1,28	6 861	58,5	80,7	65,9	
H2	341	8 672	23,1	74 000	360	1,06	4 284	49,4	30,0	1,30	91 000	363	1,06	2 800	32,3	31,4	1,36	7 471	37,5	86,2	57,3	
moy	8 287 24,5				1,03 4 158 50,1 31,2 1,28							1,05 2 493 29,7 30,8 1,26						6 505 37,4 78,3 64,3				
écart	364 1,5				0,02 297 2,0 1,7 0,02							0,01 1 370 15,8 1,5 0,11						806 19,2 6,3 4,7				
cv	4,4 6,1				1,8 7,2 4,0 5,4 1,9							1,1 54,9 53,2 5,0 8,5						12,4 51,2 8,1 7,3				

MB-16 MG-90

Température = 15°C

Température = 15°C																						
Poutres	50 cycles			½ So							Rupture							S ₀ S _r /S ₀ S ₀ /S ₅₀ S _r /S ₀				
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _½	ε _½ (μm/m)	ε _½ /ε ₅₀	S _½ (MPa)	S _½ /S ₅₀ (%)	φ _½ (deg)	φ _½ /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S ₀ (MPa)	S _r /S ₀ (%)	S ₀ /S ₅₀	S _r /S ₀	
B2	346	6 720	26,9	370 000	351	1,01	3 330	49,6	34,4	1,28	430 000	367	1,06	1 992	29,6	31,8	1,18	5 562	35,8	82,8	59,9	
D1	344	6 183	27,5	950 000	351	1,02	3 120	50,5	35,2	1,28	1 000 000	351	1,02	2 938	47,5	35,0	1,27	4 498	65,3	72,7	69,4	
A1	568	5 532	32,3	74 000	578	1,02	2 763	49,9	39,5	1,22	86 000	592	1,04	1 917	34,7	38,7	1,20	4 053	47,3	73,3	68,2	
B1	554	5 505	30,3	100 000	569	1,03	2 794	50,8	38,9	1,28	99 000	567	1,02	2 829	51,4	38,9	1,28	3 957	71,5	71,9	70,6	
C2	565	5 739	28,3	42 000	576	1,02	2 858	49,8	38,2	1,35	57 000	590	1,04	1 586	27,6	38,7	1,37	4 149	38,2	72,3	68,9	
moy	5 936	29,1					1,02	2 973	50,1	37,2	1,28			1,04	2 252	38,2	36,6	1,26	4 443	51,6	74,6	67,4
écart	516	2,2					0,00	244	0,5	2,3	0,05			0,02	597	10,7	3,2	0,07	658	16,1	4,6	4,3
cv	8,7	7,6					0,5	8,2	1,0	6,2	3,5			1,7	26,5	28,0	8,6	5,9	14,8	31,1	6,2	6,4

MB-16 150/200

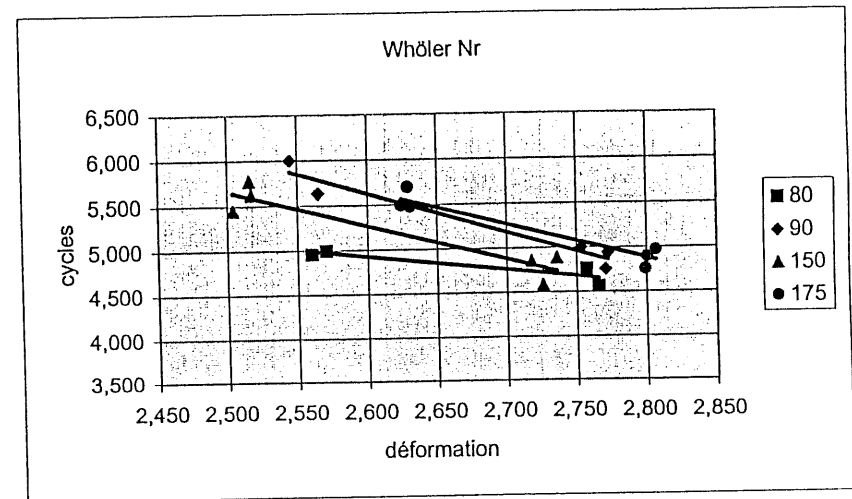
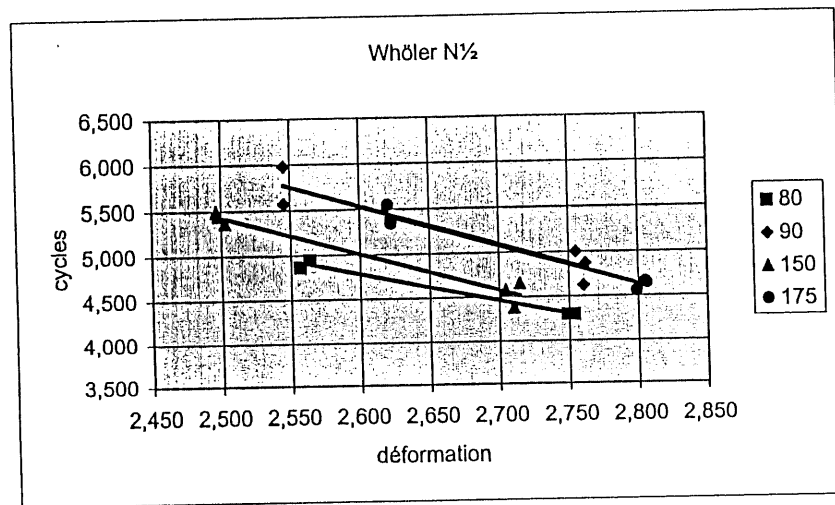
Température = 15°C

Température = 15°C																						
Poutres	50 cycles			½ So							Rupture							S ₀ S _r /S ₀ S ₀ /S ₅₀ S _r /S ₀				
	ε ₅₀ (μm/m)	S ₅₀ (MPa)	φ ₅₀ (deg)	N _r	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	N _r (rupture)	ε _r (μm/m)	ε _r /ε ₅₀	S _r (MPa)	S _r /S ₅₀ (%)	φ _r (deg)	φ _r /φ ₅₀	S ₀ (MPa)	S _r /S ₀ (%)	S ₀ /S ₅₀	S _r /S ₀	
E2	301	6 435	29,6	230000	318,1	1,06	3 156	49,0	36,2	1,22	280 000	319	1,06	2 002	31,1	35,8	1,21	4 736	42,3	73,6	66,6	
F2	310	6 171	30,9	280000	314,7	1,01	3 055	49,5	36,0	1,17	590 000	328	1,06	1 292	20,9	35,3	1,14	4 279	30,2	69,3	71,4	
H2	301	6 321	29,5	310000	313,7	1,04	3 130	49,5	36,4	1,23	420 000	329	1,09	1 593	25,2	37,5	1,27	4 601	34,6	72,8	68,0	
F1	505	5 920	31,7	38000	506,6	1,00	2 976	50,3	39,9	1,26	71 000	522	1,03	1 640	27,7	41,0	1,29	4 231	38,8	71,5	70,3	
H1	518	5 839	33,7	45000	518,5	1,00	2 952	50,6	39,4	1,17	77 000	544	1,05	1 144	19,6	39,1	1,16	4 085	28,0	70,0	72,3	
G2	496	5 658	33,0	24000	513,3	1,03	2 824	49,9	40,3	1,22	38 000	532	1,07	1 533	27,1	41,6	1,26	4 206	36,4	74,3	67,1	
moy	6 057	31,4					1,03	3 016	49,8	38,0	1,21			1,06	1 534	25,3	38,4	1,22	4 356	35,0	71,9	69,3
écart	300	1,7					0,02	124	0,6	2,0	0,04			0,02	298	4,3	2,6	0,06	254	5,3	2,0	2,4
cv	5,0	5,5					2,2	4,1	1,1	5,3	3,1			1,9	19,4	17,2	6,9	5,1	6,8	15,2	2,8	3,4

MB-16 MG-175

Température = 15°C

Température =15°C																						
Poutres	50 cycles			1/2 So							Rupture							S ₀				
	ε ₅₀	S ₅₀	φ ₅₀	N _r	ε _r	ε _r /ε ₅₀	S _r	S _r /S ₅₀	φ _r	φ _r /φ ₅₀	N _r	ε _r	ε _r /ε ₅₀	S _r	S _r /S ₅₀	φ _r	φ _r /φ ₅₀	S ₀	S _r /S ₀	S ₀ /S ₅₀	S _r /S ₀	
	(μm/m)	(MPa)	(deg)		(μm/m)		(MPa)	(%)	(deg)		(rupture)	(μm/m)		(MPa)	(%)	(deg)			(MPa)	(%)		
E2	407	3 994	35,1	350 000	417	1,02	1 995	49,9	41,8	1,19	490 000	426	1,05	1 131	28,3	39,6	1,13	2 718	41,6	68,0	73,4	
F2	402	3 971	35,2	240 000	419	1,04	1 990	50,1	42,6	1,21	300 000	427	1,06	1 303	32,8	43,0	1,22	2 890	45,1	72,8	68,9	
G2	418	4 472	34,2	220 000	419	1,00	2 243	50,2	42,0	1,23	310 000	421	1,01	1 389	31,1	41,6	1,22	3 101	44,8	69,3	72,3	
E1	610	3 838	38,1	36 000	629	1,03	1 916	49,9	45,4	1,19	57 000	630	1,03	1 221	31,8	43,9	1,15	2 574	47,4	67,1	74,4	
F1	621	4 038	37,9	46 000	638	1,03	1 957	48,5	44,8	1,18	78 000	632	1,02	810	20,1	43,8	1,16	2 760	29,3	68,4	70,9	
H1	619	3 718	38,5	44 000	640	1,03	1 896	51,0	46,0	1,19	92 000	640	1,03	839	22,6	44,8	1,16	2 398	35,0	64,5	79,1	
moy	4 005	36,5					1,03	2 000	49,9	43,8	1,20			1,03	1 116	27,8	42,8	1,17	2 740	40,5	68,3	73,2
écart	257	1,9					0,01	126	0,8	1,8	0,02			0,02	241	5,3	1,9	0,04	244	7,0	2,7	3,5
cv	6,4	5,1					1,3	6,3	1,6	4,2	1,4			1,9	21,6	19,0	4,4	3,2	8,9	17,2	4,0	4,8



Droites de fatigue à $N_{1/2}$

Température	Pente	Ordonnée	$\sigma(N_r)^*$	ϵ_6	$\sigma(N_6)$
80	-3,17	13,02	0,052	164	0,132
90	-4,42	17,02	0,224	312	0,296
150	-4,24	16,04	0,110	232	0,158
175	-4,40	16,97	0,089	309	0,132
Moyenne	-4,06				
Écart	0,599				

* $\sigma(N_{1/2})$ SHRP = 0,390

Droites de fatigue à N_r

Température	Pente	Ordonnée	$\sigma(N_{1/2})^*$	ϵ_6	$\sigma(N_6)$
80	-1,60	9,08	0,095	84	0,369
90	-4,44	17,17	0,140	328	0,182
150	-3,88	15,34	0,182	258	0,246
175	-3,89	15,78	0,121	325	0,175
Moyenne	-3,45	14,34	0,134		
Écart	1,262	3,593	0,037		

Si on ne tient pas compte de $m = -1,60$ on obtient une moyenne de $m = -4,07$

ANNEXE VI

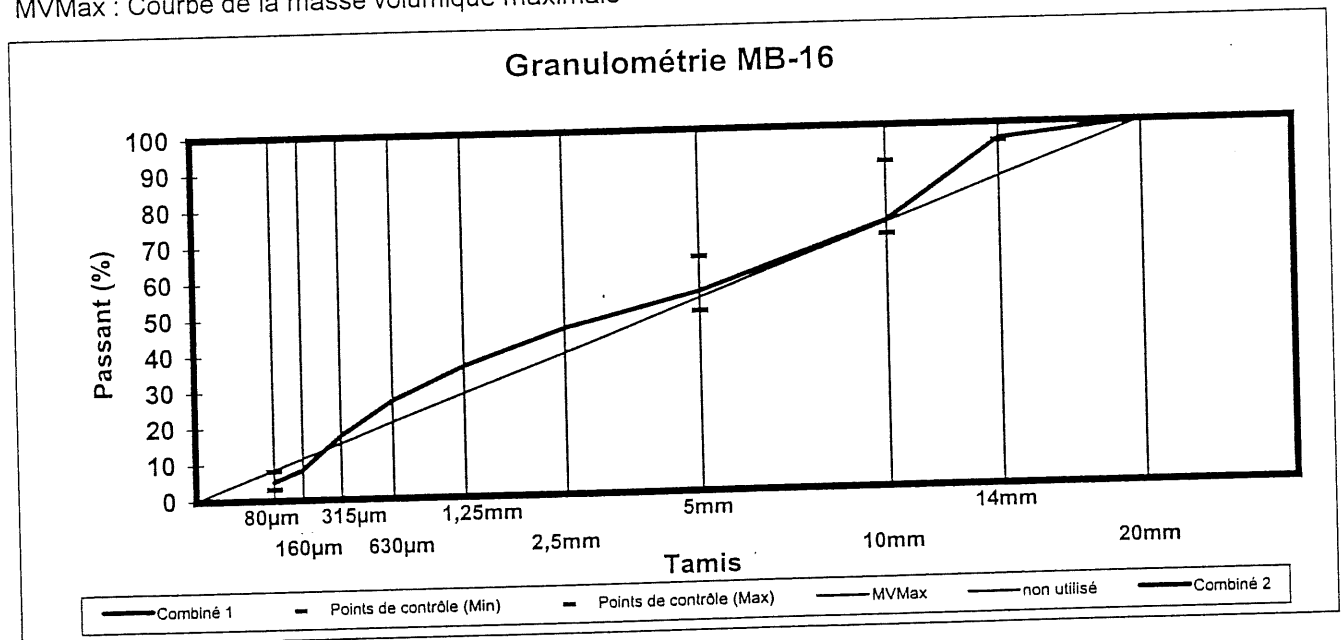
Résultats de la caractérisation des enrobés MB-16 de l'autoroute 10.



Analyse granulométrique

	Classes granulaires						Combinés		Points de contrôle		Zone de restriction	
	Sable	Crib.	P 14	P 20			1	2	Min	Max	Min	Max
Comb. 1	38,0%	27,0%	20,0%	15,0%			100,0%		%	%	%	%
Comb. 2								0,0%				
Tamis(mm)												
20	100	100	100	100			100	0	100	100		
14	100	100	98	73			96	0	95	100		
10	100	97	40	10			74	0	70	90		
5	96	66	3	3			55	0	50	65		
2,5	80	54	3	3			46	0			39,2	39,2
1,25	64	40	3	3			36	0			25,7	31,7
0,630	48	30	2	2			27	0			19,1	23,1
0,315	28	23	2	2			18	0			15,4	15,4
0,160	8	17	2	2			8	0				
0,080	2,5	12,7	1,5	1,5			4,9	0,0	3	8		

MVMax : Courbe de la masse volumique maximale



Remarque :

% Liant:

Copies à : _____

No: Laboratoire :
No: Projet :

Préparé par : _____
Approuvé par : _____
Date : _____



Service des matériaux d'infrastructures
2700, Einstein, Sainte-Foy (Québec) Canada G1P 3W8
Téléphone : (418) 644-0181 Télécopieur : (418) 646-6692





Echantillon

SABLE

N° de rapport

47-060-07

Provenance

GRAV. ST-FRANÇOIS

N° de sac, tube

191821

U.T. Mercator

Zone

Est

Ouest

Référence

Municipalité

SHERBROOKE

N° de contrat

Comté

SHERBROOKE

N° de dossier

Rang, trou, chaîn.

N° de source

Usage proposé

Enrobés bitumineux

Prélevé par

F. DUCRET

le

97-10-07

Endroit

Soumis par

ENR. BITUMINEUX

le

97-11-24

Granulométrie (% passant)

Essais divers

Tamis	Séparé	Combiné	Exigences				
				Nombre néphélobanque		Indef. de malasse	
				Hq504 > 5mm		% Hq504 < 5mm	
				Densité brute > 5mm		Absorption en eau > 5mm	
				Densité brute < 5mm	2.030	Absorption en eau < 5mm	1.031
112 mm				masse tassée kg/m ³		masse non tassée kg/m ³	
80 mm				Particules plates		% Particules allongées	
56 mm				Los Angeles		Rien Deval	
40 mm				Module de finesse < 5mm	2.65	Module de finesse < 10mm	
28 mm				Valeur au bleu		Essai à la sonde	
20 mm				Fragmentation		% Friabilité	
14 mm				< 2 micromètres		Coefficient d'écoulement	
10 mm		100					
5.00mm	100	36					
2.50mm	83	80					
1.25mm	66	64					
630 um	49	48					
315 um	29	28					
160 um	9	8					
80 um	3.6	2.5					
5 um							

Remarques

Voir verso no:

Copies à

ENR. BITUMINEUX

F. DUCRET

Préparé par

Approuvé par

Date

Guylian Gosselin Tech.

R. Guy TREMBLAY Ing. A.S.C.A.

97/11/24

Échantillon CRIBLURE		N° de rapport AV-128-97	
Provenance CARR. DESOURDY		N° de sac, tube 191872	
Zone U.T. Mercator		Référence	
Municipalité ASCOT-CANTON		N° de contrat	
Comté SHERBROOKE		N° de dossier	
Lang. trou, chaîn.		N° de source	
Usage proposé Enrobés bitumineux		Prélevé par E. DOUCET le 97-10-07	
Produit		Soumis par ENR. BITUMINEUX le 97-11-24	

Granulométrie (% passant)				Essais divers			
Amis	Séparé	Combiné	Exigences				
				Nombre pétrographique		Indice de polissage	
				MgSO4 > 5mm		% HgSO4 < 5mm	
				Densité brute > 5mm	2.862	Absorption en eau > 5mm	0.84%
				Densité brute < 5mm	2.846	Absorption en eau < 5mm	0.73%
13 mm				Masse tassée kg/m³		Masse non tassée kg/m³	
30 mm				Particules plates		% Particules allongées	
56 mm				Los Angeles ()		Riero Deval ()	
40 mm				Module de finesse < 5mm	2.51	Module de finesse < 10mm	
28 mm				Valeur au bleu ()		Essai à la soude	
20 mm				Fragmentation		% Friabilité	
14 mm	100	100		< 2 micromètres		Coefficient d'écrasement	
10 mm	90	97					
5,00 mm	100	66					
2,50 mm	81	54					
1,25 mm	61	40					
630 µm	46	30					
315 µm	34	23					
160 µm	26	17					
80 µm	19.4	12.7					
5 µm							

Remarques Voir verso n°:

Copie à

Préparé par **Guylain Gosselin Tech.**

Approuvé par **M. Guy Tremblay Ing. M.Sc.A.**

Date **97-11-24**

ENR. BITUMINEUX
E. DOUCET

Echantillon

PIERRE CONC.

N° de rapport

AP-129-97

Provenance

CARR. DESOURDY

N° de sac, tube

191823

U.T. Mercator

Zone

Est

Ouest

Référence

Municipalité

ASCOT-CANTON

N° de contrat

Comté

SHERBROOKE

N° de dossier

Rang, trou, chain.

N° de source

Usage proposé

Enrobés bitumineux

Prélevé par

F. DOUCET le 97-10-07

Endroit

Soumis par

ENR. BITUMINEUX le 97-11-24

Granulométrie (% passant)

Essais divers

Tamis	Séparé	Combiné	Exigences				
				Nombre pétrographique		Coef. de bulsage	
				Massa > 5mm		Massa < 5mm	
				Densité brute > 5mm	2.863	Absorption en eau > 5mm	0.66%
				Densité brute < 5mm		Absorption en eau < 5mm	
112 µm				Massa tassée kg/m³		Massa non tassée kg/m³	
80 µm				Particules plates		Particules allongées	
56 µm				Los Angeles ()		Micro Deval ()	
40 µm				Module de finesse < 5mm	5.05	Module de finesse < 10mm	
20 µm				Valeur au bleu ()		Essai à la soude	
14 µm	100	100	100	Écrasement		Friabilité	
10 µm	98	98	90-100	< 2 micromètres		Coefficient d'écoulement	
5.00 mm	38	40	45-75				
2.50 mm	100	3	0-15				
1.25 mm			0-5				
630 µm							
315 µm							
160 µm							
80 µm							
5 µm							

Remarques

Voir verso no:

Copies à

ENR. BITUMINEUX

F. DOUCET

Préparé par

Approuvé par

Date

Guydon Coppette Tech.

M. Guy Tremblay H. S. A.

97/12/

Echantillon

PIERRE CONC.

N° de rapport

AP-100-97

Provenance	CARR. DESMURDY	N° de sac, tube	191824
Zone	U.T. Mercator	Est	Ouest
Municipalité	ASCOT-CANTON	N° de contrat	
Comté	SHERBROOKE	N° de dossier	
Rang, trou, chain.		N° de source	
Usage proposé	Enrobés bitumineux	Prélevé par	F. DOUCET le 97-10-07
Endroit		Soumis par	ENR. BITUMINEUX le 97-11-24

Granulométrie (% passant)

Essais divers

Tamis	Séparé	Combiné	Exigences	Nombre pétrographique	Coef. de polissage
				ngs04 > 5mm	ngs04 < 5mm
				Densité brute > 5mm	2.830 Absorption en eau > 5mm
				Densité brute < 5mm	Absorption en eau < 5mm
112 mm				masse tassée kg/m³	masse non tassée kg/m³
80 mm				Particules plates	Particules allongées
56 mm				Los Angeles ()	Micro Deval ()
40 mm				Module de finesse < 5mm	5.05 Module de finesse < 10mm
20 mm	100	100	90-100	Valeur au bleu ()	Essai à la soude
14 mm	72	73		Fragmentation	Eriabilité
10 mm	7	10	* 20-60	< 2 micromètres	Coefficient d'écoulement
5.00mm	100	3	0-10		
2.50mm			* 0-5		
1.25mm					
630 µm					
315 µm					
160 µm					
80 µm					
5 µm					

Remarques

Voir verso no:

Copies à

ENR. BITUMINEUX

F. DOUCET

Préparé par

Approuvé par

Date

Guylian Rossette tech.

A. Guy Tremblay Ing. A.Sc.A.

97/12/



Détermination de la classe de performance du bitume

Producteur : Shell
Localisation :
Type de bitume : 80/100 ordinaire
Classification SHRP : PG 58-22
Analysé par : Daniel Ferland 98-01-21
Approuvé par : Jean-Claude Moreux Ph.D., chim.
Soumis par secteur enrobés
Projet Félix Doucet

Valeur de t_g pour $G^*/\sin\delta=1.0\text{kPa}$	62.7°C
% de gain au R.T.F.O.T	+0.034
Point éclair °C	344
Viscosité Brookfield cP 135°C	360
Viscosité Brookfield cP 165°C	100
Pén. originale 25°C	64
Pénétration après RTFOT 25°C	40
Numéro de laboratoire	LH97135

Cisaillement dynamique - original						Cisaillement dynamique - R.T.F.O.T.					
Temp °C	Diam. du disque mm	% déformation	G* kPa	Angle de phase	G*/sinδ kPa	Temp. °C	Diam. du disque mm	% déformation	G* kPa	Angle de phase	G*/sinδ kPa
58	25 mm	12.04	1.86	84.8	1.87	5	25 mm	0.17	9389	10.0	53840
64	"	11.93	0.84	85.9	0.84	10	"	0.21	7784	15.5	29220
						15	"	0.31	5284	27.1	11600
						20	"	0.58	2814	41.9	4215
						70	"	9.98	4.79	80.6	4.86
						76	"	10.02	2.13	82.6	2.14

Cisaillement dynamique-PAV						Flexion de poutre (Bitume vieilli au RTFOT et PAV)					
Temp °C	Diam. du disque mm	% déformation	G* kPa	Angle de phase	G*/sinδ kPa	Temp °C	Module S(60) MPa	m	Temp °C	Module S(60) MPa	m
5	8 mm	0.96	51780	28.9	24990	-12	145	.333	-12	149	.332
10	"	1.02	31290	32.5	16820	-18	314	.282	-18	320	.285
15	"	1.01	16230	37.4	9855						
20	"	0.99	7942	42.3	5344	Température où S(60)=300MPa				-27.6°C	
						Température où m(60)=0.300				-26.0°C	

Essais conformes aux normes: AASHTO MP1-93, AASHTO PP1-93, AASHTO PP6-93, AASHTO TP1-93, AASHTO TP5-93
AASHTO TP3-93, AASHTO TP-48-94. LC 25-03, LC 25-05

Conforme ISO 9002 et CAN-P-4C

Service des matériaux de chaussées
Parc Technologique du Québec Métropolitain, 2700 rue Einstein, Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8
418-644-0181 * Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

Service des matériaux d'infrastructures
2700, Einstein, Sainte-Foy (Québec), G1P 3W8
Téléphone : (418) 644-0181 Télécopieur : (418) 646-6692





Détermination de la classe de performance du bitume

Producteur : Shell
Localisation :
Type de bitume : Multi-grade 90
Classification SHRP : PG 64-28
Analysé par : Daniel Ferland 98-01-21
Approuvé par : Jean-Claude Moreux Ph.D., chim.
Soumis par secteur enrobés
Projet Félix Doucet

Valeur de t_a pour $G^*/\sin\delta=1.0\text{kPa}$	71.2
% de perte au R.T.F.O.T	.041
Point éclair °C	310
Viscosité Brookfield cP 135°C	590
Viscosité Brookfield cP 165°C	160
Pén. originale 25°C	82
Pénétration après RTFOT 25°C	52
Numéro de laboratoire	LH97134

Cisaillement dynamique - original						Cisaillement dynamique - R.T.F.O.T.					
Temp °C	Diam. du disque mm	% déformation	G* kPa	Angle de phase	G*/sinδ kPa	Temp. °C	Diam. du disque mm	% déformation	G* kPa	Angle de phase	G*/sinδ KPa
64	25 mm	12.07	1.40	76.9	1.43	5	25 mm	0.20	8237	14.3	33400
70	"	12.00	0.78	79.1	0.79	10	"	0.25	6471	21.2	17930
						15	"	0.35	4641	27.6	10020
						20	"	0.67	2448	36.3	4134
						70	"	9.92	2.36	71.4	2.48
						76	"	10.00	1.28	73.2	1.34

Cisaillement dynamique-PAV						Flexion de poutre (Bitume vieilli au RTFOT et PAV)					
Temp °C	Diam. du disque mm	% déformation	G* kPa	Angle de phase	G*/sinδ kPa	Temp °C	Module S(60) MPa	m	Temp °C	Module S(60) MPa	m
5	8 mm	1.03	30910	29.9	15420	-18	196	.304	-18	189	.306
10	"	1.02	18490	31.2	9589	-24	350	.266	-24	335	.256
15	"	1.01	11000	33.5	6066						
20	"	1.00	6037	36.0	3548	Température où S(60)=300MPa				-32.6°C	
						Température où m(60)=0.300				-28.7°C	

Essais conformes aux normes: AASHTO MP1-93, AASHTO PP1-93, AASHTO PP6-93, AASHTO TP1-93, AASHTO TP5-93
AASHTO TP3-93, AASHTO TP-48-94. LC 25-03, LC 25-05

Conforme ISO 9002 et CAN-P-4C

Service des matériaux de chaussées

Parc Technologique du Québec Métropolitain, 2700 rue Einstein, Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8
Tél.: (418) 644-0181 * Télécopieur (Fax): (418) 646-6692



Service des matériaux d'infrastructures
2700, Einstein, Sainte-Foy (Québec), G1P 3W8
Téléphone : (418) 644-0181 Télécopieur : (418) 646-6692





Détermination de la classe de performance du bitume

Producteur : Shell
Localisation :
Type de bitume : 150/200
Classification SHRP : PG 52-28
Analysé par : Daniel Ferland 98-01-21
Approuvé par : Jean-Claude Moreux Ph.D., chim.
Soumis par secteur enrobés
Projet Félix Doucet

Valeur de t_g pour $G^*/\sin\delta=1.0\text{kPa}$	62.7°C
% de perte au R.T.F.O.T	0.018
Point éclair °C	338
Viscosité Brookfield cP 135°C	200
Viscosité Brookfield cP 165°C	60
Pén. originale 25°C	120
Pénétration après RTFOT 25°C	70
Numéro de laboratoire	LH97137

Cisaillement dynamique - original						Cisaillement dynamique - R.T.F.O.T.					
Temp °C	Diam. du disque mm	% déformation	G^* kPa	Angle de phase	$G^*/\sin\delta$ kPa	Temp. °C	Diam. du disque mm	% déformation	G^* kPa	Angle de phase	$G^*/\sin\delta$ kPa
52	25 mm	12.03	1.65	85.3	1.65	5	25 mm	0.19	8504	16.5	29950
58	"	11.99	0.86	86.2	0.87	10	"	0.25	6573	23.9	16190
						15	"	0.47	3492	38.3	5640
						20	"	1.11	1469	52.5	1852
						52	"	10.01	4.00	80.7	4.05
						58	"	10.01	1.88	82.8	1.89

Cisaillement dynamique-PAV						Flexion de poutre (Bitume vieilli au RTFOT et PAV)					
Temp °C	Diam. du disque mm	% déformation	G^* kPa	Angle de phase	$G^*/\sin\delta$ KPa	Temp °C	Module S(60) MPa	m	Temp °C	Module S(60) MPa	m
5	8 mm	1.01	31370	35.4	18160	-18	216	.343	-18	205	.336
10	"	1.01	13861	42.0	9264	-24	461	.278	-24	452	.269
15	"	1.00	5898	47.0	4312						
20	"	1.02	3255	50.8	2524	Température où $S(60)=300\text{MPa}$				-30.7°C	
						Température où $m(60)=0.300$				-31.6°C	

Essais conformes aux normes: AASHTO MP1-93, AASHTO PP1-93, AASHTO PP6-93, AASHTO TP1-93, AASHTO TP5-93
AASHTO TP3-93, AASHTO TP48-94. LC 25-05

Conforme ISO 9002 et CAN-P-4C

Service des matériaux de chaussées
Parc Technologique du Québec Métropolitain, 2700 rue Einstein, Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8
468-0181 * Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

Service des matériaux d'infrastructures
2700, Einstein, Sainte-Foy (Québec), G1P 3W8
Téléphone: (418) 644-0181 Télécopieur: (418) 646-6692





Détermination de la classe de performance du bitume

Producteur : Shell
Localisation :
Type de bitume : Multi-grade 175
Classification SHRP : PG 58-34
Analysé par : Daniel Ferland 98-01-21
Approuvé par : Jean-Claude Moreux Ph.D., chim.
Remarque :
Soumis par secteur enrobés
Projet Félix Doucet

Valeur de t_g pour $G^*/\sin\delta=1.0\text{kPa}$	58.5°C
% de perte au R.T.F.O.T	0.036
Point éclair °C	306
Viscosité Brookfield cP 135°C	300
Viscosité Brookfield cP 165°C	100
Pén. originale 25°C	122
Pénétration après RTFOT 25°C	70
Stabilité au stockage	0.5°C
Solubilité (%) à 25°C	99.848
Retour élastique 10°C %	12.5
Numéro de laboratoire	LH97136

Cisaillement dynamique - original						Cisaillement dynamique - R.T.F.O.T.					
Temp °C	Diam. du disque mm	% déformation	G^* kPa	Angle de phase	$G^*/\sin\delta$ kPa	Temp. °C	Diam. du disque mm	% déformation	G^* kPa	Angle de phase	$G^*/\sin\delta$ kPa
58	25 mm	12.04	1.05	80.6	1.06	5	25 mm	0.25	6614	21.8	17820
64	"	12.01	0.53	82.1	0.54	10	"	0.39	4170	30.6	8204
						15	"	0.72	2262	39.2	3581
						20	"	1.64	996	48.3	1334
						58	"	10.07	3.16	72.8	3.31
						64	"	10.05	1.63	74.5	1.69

Cisaillement dynamique-PAV						Flexion de poutre (Bitume vieilli au RTFOT et PAV)					
Temp °C	Diam. du disque mm	% déformation	G^* kPa	Angle de phase	$G^*/\sin\delta$ kPa	Temp °C	Module S(60) MPa	m	Temp °C	Module S(60) MPa	m
5	8 mm	1.02	17860	33.3	9809	-24	268	.303	-24	260	.298
10	"	0.98	10110	35.8	5917	-30	452	.254	-30	519	.252
15	"	1.00	5195	38.9	3264						
20	"	1.00	3006	40.3	1943	Température où $S(60)=300\text{MPa}$				-35.3°C	
						Température où $m(60)=0.300$				-34.1°C	

Essais conformes aux normes: AASHTO MP1-93, AASHTO PP1-93, AASHTO PP6-93, AASHTO TP1-93, AASHTO TP5-93
AASHTO TP3-93, AASHTO TP-48-94. LC 25-03, LC 25-05

Conforme ISO 9002 et CAN-P-4C

Service des matériaux de chaussées
Parc Technologique du Québec Métropolitain, 2700 rue Einstein, Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8
418 644-0181 * Télécopieur (Fax) : (418) 646-6692

Service des matériaux d'infrastructures
2700, Einstein, Sainte-Foy (Québec), G1P 3W8
Téléphone : (418) 644-0181 Télécopieur : (418) 646-6692



TABLE C-1
SHERBROOKE SATELLITE TEST ROAD
AS SUPPLIED ASPHALTS
MTQ TEST DATA- CENTRAL LAB

Test Section	A	B	C	D
Grade	150-200	80-100	80-100	150-1200
Type	Multigrade 175	Standard	Multigrade 90	Standard
Supplier	Shell	Shell	Shell	Shell
Location	Montreal	Montreal	Montreal	Montreal
Crude Source	Mexican	Mexican	Mexican	Mexican
As Supplied				
Penetration, dmm 25°C,	179	95	97	165
100g, 5s	248	149	136	249
30°C	65	32	38	51
15°C	32	14	22	24
10°C	29	12	15	17
5°C	86	138	295	60.1
Absolute Viscosity, Pa.s @ 60°C	321	340	619	324**
Kinematic Viscosity, mm²/s @ 135°C	*	*	*	*
Specific Gravity	42.6	46.6	49.3	40.1
Softening Point, T R&B, C	93.3	*	99.4	99.7
Solubility, %				
Tests on Residue after TFOT				
% Loss	*	*	*	*
Absolute Viscosity, Pa.s 60°C	340	*	1125	*
Kinematic Viscosity, mm²/s 135°C	597	*	1164	*
Penetration dmm, 25°C	81	*	57	*
100g 5s	38	*	28	*
15°C	25	*	16	*
10°C	15	*	10	*
5°C	94	*	44.5	*
Ductility 25°C (5cm/min), cm	3.95	*	3.81	*
Absolute Visc. Ratio	45.3	*	58.8	*
Pen., % of original				

Note: *Not reported
**Typographical error, may have been 234, not used in combined data plot.

FI 9.2.26-011

Gouvernement du Québec
Ministère des Transports
Direction Lab. des chaussées

Détermination de la densité maximale
(Méthode pycnométrique)

NORME: NQ 2300-045 (87-12-15)

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
97-1177	80/100 Shell	

		Échantillons no:		
		N	B	H
Numéro de la fiole		7		
Masse du mélange	A	734.1	1130.6	1163.6
Masse (fiole + plaque + mélange + eau)	B	6531.8	6907.7	6823.3
Température de l'eau (T°C)		23.9	23.9	24.0
Masse (fiole + plaque + eau) <<note 1>>	C	6081.8	6213.9	6167.5
Facteur de correction <<note 2>>	D	1.000276	1.000276	1.000252
Densité maximale	E	2.5847	2.5890	2.5991
Densité maximale moyenne			2.5868	

Note 1 : voir la charte de calibration de la fiole (volume "Calibration" du manuel qualité)
Note 2 : Voir le tableau 1 à la page 13 de la norme NQ 2300-045 (87/12/15)

Calcul de la densité maximale (E)

Notes

$$E = \frac{A}{A + C - B} \times D$$

Equipements	
Balance no: 000011	Thermomètre no: 898118
Agitateur no: 003467	Pompe à vide no: 000683
Manomètre no: 000071	Autres no:

Point de vérification (PV)		
Ecart maximal admissible répétabilité (r)		
r ≤ 0,011	C	NC

Réduction d'échantillon	
Inquartation	
Diviseur d'échantillon	✓

Échantillon préparé par:	
Essai effectué par:	
Date de l'essai:	97/12/08

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 643-3178 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

C:\ISO\FORM045.WK4 (Janvier 1996)

Gouvernement du Québec
Ministère des Transports
Direction Lab. des chaussées

Détermination de la densité maximale
(Méthode pycnométrique)

NORME: NQ 2300-045 (87-12-15)

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
97-1174	HOUTIGRADE 175	

		Échantillons no:		
		H	N	B
Numéro de la fiole		970.8	970.1	920.5
Masse du mélange	A	6702.3	6675.8	6777.4
Masse (fiole + plaque + mélange + eau)	B	23.7	24.6	24.7
Température de l'eau (T°C)		6107.7	6021.1	6213.1
Masse (fiole + plaque + eau) <<note 1>>	C	1000326	1.000102	1.000076
Facteur de correction <<note 2>>	D	25814	25845	25844
Densité maximale	E		2.5844	
Densité maximale moyenne			2.5844	

Note 1 : voir la charte de calibration de la fiole (volume "Calibration" du manuel qualité)
Note 2 : Voir le tableau 1 à la page 13 de la norme NQ 2300-045 (87/12/15)

Calcul de la densité maximale (E)

Notes

$$E = \frac{A}{A + C - B} \times D$$

Equipements	
Balance no: 000011	Thermomètre no: 898118
Agitateur no: 003467	Pompe à vide no: 000683
Manomètre no: 000071	Autres no:

Point de vérification (PV)		
Ecart maximal admissible répétabilité (r)		
r ≤ 0,011	C	NC

Réduction d'échantillon	
Inquartation	
Diviseur d'échantillon	

Échantillon préparé par:	
Essai effectué par:	
Date de l'essai:	24/12/05

Service des matériaux de chaussées

Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8

Tél.: (418) 643-3178 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

Gouvernement du Québec
Ministère des Transports
Direction Lab. des chaussées

Détermination de la densité maximale
(Méthode pycnométrique)

NORME: NQ 2300-045 (87-12-15)

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
97-1177	150/200 Shell	

Échantillons no:			
Numéro de la fiole	N	H	B
Masse du mélange A	812.8	842.7	641.9
Masse (fiole + plaque + mélange + eau) B	657.3	662.5	660.7
Température de l'eau (T°C)	24.7	25.2	25.2
Masse (fiole + plaque + eau) <<note 1>> C	607.0	610.1	621.6
Facteur de correction <<note 2>> D	10000.76	0.999947	0.999947
Densité maximale E	2.5846	2.5826	2.5840
Densité maximale moyenne		2.5843	

Note 1 : voir la charte de calibration de la fiole (volume "Calibration" du manuel qualité)
Note 2 : Voir le tableau 1 à la page 13 de la norme NQ 2300-045 (87/12/15)

Calcul de la densité maximale (E)

Notes

$$E = \frac{A}{A + C - B} \times D$$

Equipements	
Balance no: 000011	Thermomètre no: 898118
Agitateur no: 003467	Pompe à vide no: 000683
Manomètre no: 000071	Autres no:

Point de vérification (PV)		
Ecart maximal admissible répétabilité (r)		
r ≤ 0,011	C	NC

Réduction d'échantillon	
Inquartation	
Diviseur d'échantillon	

Échantillon préparé par:	
Essai effectué par:	
Date de l'essai:	27/10/96

Service des matériaux de chaussées
Parc technologique du Québec Métropolitain, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, (QC) G1P 3W8
Tél.: (418) 643-3178 Télécopieur (Fax): (418) 646-6692

Sample ID: 454120

Time: 10:54

Date: 11/12/97

Serial Number: 106
Pressure: 600. KPa

[illegible]

Sample ID: C-5H2P

Time: 11:24

Date: 11/12/97

Gayial Number: 106
 Pressure: 600. KPa

[illegible]

97-1197

Sifume 20/100 Shell

TROXLER 4140 Gyrotory Compactor

p.1

Sample ID: C7-542P

Time: 11:34

Date: 11/12/97

Serial Number: 106
Pressure: 800. KPa

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	138.2	132.9	131.1	129.5	128.4	127.5	126.7	126.1	125.6	125.1
10	124.7	124.3	124.0	123.7	123.4	123.2	122.9	122.7	122.5	122.3
20	122.1	121.9	121.8	121.6	121.5	121.3	121.2	121.1	120.9	120.8
30	120.7	120.6	120.5	120.4	120.3	120.2	120.1	120.1	120.0	119.9
40	119.6	119.6	119.7	119.6	119.6	119.5	119.4	119.4	119.3	119.3
50	119.2	119.2	119.1	119.1	119.0	119.0	118.9	118.9	118.8	118.6
60	118.7	118.7	118.7	118.6	118.6	118.6	118.5	118.5	118.5	118.4
70	118.4	118.3	118.3	118.3	118.3	118.2	118.2	118.2	118.1	118.1
80	118.1	118.1	118.0	118.0	118.0	118.0	117.9	117.9	117.9	117.9
90	117.8	117.8	117.8	117.8	117.8	117.7	117.7	117.7	117.7	117.7
100	117.7	117.6	117.6	117.6	117.6	117.6	117.6	117.5	117.5	117.5
110	117.5	117.5	117.5	117.4	117.4	117.4	117.4	117.4	117.4	117.4
120	117.4	117.3	117.3	117.3	117.3	117.3	117.3	117.3	117.3	117.3
130	117.2	117.2	117.2	117.2	117.2	117.2	117.2	117.2	117.2	117.2
140	117.2	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1
150	117.1	117.1	117.1	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0
160	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	116.9	116.9	116.9	116.9
170	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9
180	116.9	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8
190	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.7	116.7	116.7
200	116.7									

10 - 7.78%
 20 - 5.81%
 40 - 3.95%
 60 - 3.04%
 80 - 2.46%
 100 - 2.04%
 120 - 1.77%
 150 - 1.48%
 200 - 1.15%

97-1177

Q. 4

Date: 10/12/97

[illegible]

Turner: 80/100 Shell Multi-Grade 40

95-1147

TREXLER 1140 Gyrotron Compressor

2.1

Sample ID: C-5 H22

Time: 14:31

Date: 10/12/97

Serial Number: 106
Pressure: 500. KPa

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	138.8	132.4	130.5	129.1	128.0	127.2	126.4	125.8	125.3	124.8
10	124.4	124.1	123.7	123.5	123.2	122.9	122.7	122.5	122.3	122.1
20	121.9	121.8	121.6	121.4	121.3	121.1	121.0	120.9	120.8	120.7
30	120.5	120.4	120.3	120.3	120.2	120.1	120.0	119.9	119.8	119.8
40	119.7	119.6	119.5	119.5	119.4	119.4	119.3	119.2	119.2	119.1
50	119.1	119.0	119.0	118.9	118.9	118.8	118.8	118.7	118.7	118.7
60	118.6	118.6	118.5	118.5	118.5	118.4	118.4	118.4	118.3	118.3
70	118.3	118.2	118.2	118.2	118.1	118.1	118.1	118.0	118.0	118.0
80	118.0	117.9	117.9	117.9	117.9	117.9	117.8	117.8	117.8	117.8
90	117.7	117.7	117.7	117.7	117.7	117.6	117.6	117.6	117.6	117.6
100	117.6	117.5	117.5	117.5	117.5	117.5	117.4	117.4	117.4	117.4
110	117.4	117.4	117.4	117.3	117.3	117.3	117.3	117.3	117.3	117.3
120	117.3	117.2	117.2	117.2	117.2	117.2	117.2	117.2	117.2	117.2
130	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1
140	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0
150	117.0	117.0	117.0	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9
160	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9
170	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8
180	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8
190	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7
200	116.7									

10 - 7.52 %
20 - 5.6 %
40 - 3.87 %
60 - 3.10 %
80 - 2.57 %
100 - 2.16 %
120 - 1.93 %
150 - 1.71 %
200 - 1.46 %

[illegible]

[illegible]

D, time: Shell 150/200

TROXLER 4140 Gyrotory Compactor

p.1

Sample ID: 4 SHRP

Time: 10:18

Date: 9/12/97

Serial Number: 106
Pressure: 600. KPa

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	140.8	134.3	122.4	130.8	129.6	128.7	127.9	127.3	126.7	126.3
10	125.8	125.5	125.1	124.9	124.5	124.3	124.1	123.3	123.5	123.4
20	123.2	123.0	122.8	122.7	122.5	122.4	122.2	122.1	121.9	121.8
30	121.7	121.6	121.5	121.4	121.2	121.2	121.1	121.0	120.9	120.8
40	120.7	120.6	120.5	120.5	120.4	120.3	120.2	120.2	120.1	120.1
50	120.0	119.9	119.9	119.8	119.8	119.7	119.6	119.6	119.5	119.5
60	119.4	119.4	119.3	119.3	119.3	119.2	119.2	119.1	119.1	119.0
70	119.0	119.0	118.9	118.9	118.8	118.8	118.8	118.7	118.7	118.7
80	118.6	118.6	118.5	118.5	118.5	118.5	118.4	118.4	118.4	118.3
90	118.3	118.3	118.3	118.2	118.2	118.2	118.1	118.1	118.1	118.1
100	118.0	118.0	118.0	118.0	117.9	117.9	117.9	117.9	117.8	117.8
110	117.8	117.8	117.8	117.7	117.7	117.7	117.7	117.7	117.6	117.6
120	117.6	117.6	117.5	117.5	117.5	117.5	117.5	117.4	117.4	117.4
130	117.4	117.4	117.4	117.3	117.3	117.3	117.3	117.3	117.2	117.2
140	117.2	117.2	117.2	117.2	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1
150	117.1	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	116.9	116.9
160	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8
170	116.8	116.8	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7
180	116.7	116.6	116.6	116.6	116.6	116.6	116.6	116.6	116.6	116.6
190	116.5	116.5	116.5	116.5	116.5	116.5	116.5	116.5	116.5	116.5
200	116.4									

10 - 8.70 %
 20 - 6.68 %
 40 - 4.70 %
 60 - 3.63 %
 80 - 2.98 %
 100 - 2.38 %
 120 - 2.13 %
 150 - 1.63 %
 200 - 1.12 %

Bitume: Shell MULTIGRADE 175

TROXLER 4140 Gyrotory Compactor

p.1

Sample ID: C-5HR²

Time: 11:51

Date: 5/12/97

Serial Number: 106
Pressure: 500. KPa

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	138.9	132.3	131.1	129.6	128.5	127.6	126.9	126.3	125.7	125.3
10	124.9	124.6	124.3	123.9	123.6	123.4	123.2	122.9	122.7	122.5
20	122.3	122.2	122.0	121.8	121.7	121.5	121.4	121.3	121.2	121.0
30	120.9	120.8	120.7	120.6	120.5	120.4	120.3	120.2	120.2	120.1
40	120.0	119.9	119.9	119.8	119.7	119.6	119.6	119.5	119.5	119.4
50	119.3	119.3	119.2	119.2	119.1	119.1	119.0	119.0	118.9	118.9
60	119.8	118.8	118.7	118.7	118.7	118.6	118.6	118.5	118.5	118.5
70	118.4	118.4	118.4	118.3	118.3	118.3	118.2	118.2	118.2	118.1
80	118.1	118.1	118.0	118.0	118.0	117.9	117.9	117.9	117.9	117.8
90	117.8	117.8	117.8	117.7	117.7	117.7	117.7	117.6	117.6	117.6
100	117.6	117.6	117.5	117.5	117.5	117.5	117.4	117.4	117.4	117.4
110	117.4	117.4	117.3	117.3	117.3	117.3	117.3	117.3	117.2	117.2
120	117.2	117.2	117.2	117.2	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1
130	117.1	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	116.9
140	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.8	116.8	116.8
150	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.7	116.7	116.7	116.7
160	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7	116.6	116.6	116.6	116.6	116.6
170	116.6	116.6	116.6	116.6	116.6	116.6	116.6	116.5	116.5	116.5
180	116.5	116.5	116.5	116.5	116.5	116.5	116.5	116.5	116.4	116.4
190	116.4	116.4	116.4	116.4	116.4	116.4	116.4	116.4	116.4	116.4
200	116.4									

(Signature)

Bitume : Shell MULTIGRADE 175

TROXLER 4140 Gyrotory Compactor

p.1

Sample ID: C-5HLP

Time: 11:32

Date: 5/12/97

Serial Number: 105
Pressure: 600. KPa

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	139.5	133.3	131.3	130.0	128.9	128.0	127.3	126.7	126.1	125.7
10	125.3	124.9	124.6	124.3	124.0	123.8	123.5	123.3	123.1	122.9
20	122.7	122.6	122.4	122.3	122.1	122.0	121.8	121.7	121.6	121.5
30	121.3	121.2	121.1	121.0	120.9	120.9	120.8	120.7	120.6	120.5
40	120.4	120.4	120.3	120.2	120.2	120.1	120.0	120.0	119.9	119.8
50	119.8	119.7	119.7	119.6	119.6	119.5	119.5	119.4	119.4	119.3
60	119.3	119.2	119.2	119.2	119.1	119.1	119.0	119.0	119.0	118.9
70	118.9	118.9	118.8	118.8	118.8	118.7	118.7	118.7	118.6	118.6
80	118.6	118.5	118.5	118.5	118.5	118.4	118.4	118.4	118.3	118.3
90	118.3	118.3	118.2	118.2	118.2	118.2	118.1	118.1	118.1	118.1
100	118.1	118.0	118.0	118.0	118.0	117.9	117.9	117.9	117.9	117.9
110	117.8	117.8	117.8	117.8	117.8	117.8	117.7	117.7	117.7	117.7
120	117.7	117.7	117.6	117.6	117.6	117.6	117.6	117.6	117.5	117.5
130	117.5	117.5	117.5	117.5	117.5	117.4	117.4	117.4	117.4	117.4
140	117.4	117.4	117.4	117.3	117.3	117.3	117.3	117.3	117.3	117.3
150	117.3	117.3	117.2	117.2	117.2	117.2	117.2	117.2	117.2	117.2
160	117.2	117.2	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1
170	117.1	117.1	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0
180	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9
190	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9	116.9
200	116.8									

[Handwritten signature]

97-1177

Future: Shell MULTILADE 175

TROXLER 4140 Gyrotory Compactor

p.1

Sample ID: C-5 #100

Time: 11:42

Date: 5/12/97

Serial Number: 106

Pressure: 600. KPa

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	138.6	132.5	130.8	129.2	128.2	127.3	126.6	126.0	125.4	125.0
10	124.6	124.2	123.9	123.6	123.3	123.1	122.8	122.6	122.4	122.2
20	122.0	121.8	121.7	121.5	121.4	121.2	121.1	121.0	120.9	120.7
30	120.6	120.5	120.4	120.3	120.2	120.1	120.0	120.0	119.9	119.8
40	119.7	119.6	119.6	119.5	119.4	119.4	119.3	119.2	119.2	119.1
50	119.1	119.0	119.0	118.9	118.9	118.8	118.8	118.7	118.7	118.6
60	118.6	118.5	118.5	118.4	118.4	118.4	118.3	118.3	118.2	118.2
70	118.2	118.1	118.1	118.1	118.0	118.0	118.0	117.9	117.9	117.9
80	117.8	117.8	117.8	117.7	117.7	117.7	117.6	117.6	117.6	117.6
90	117.5	117.5	117.5	117.5	117.4	117.4	117.4	117.4	117.3	117.3
100	117.3	117.3	117.3	117.2	117.2	117.2	117.2	117.2	117.1	117.1
110	117.1	117.1	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	116.9	116.9
120	116.9	116.9	116.9	116.9	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8
130	116.8	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7
140	116.6	116.6	116.6	116.6	116.6	116.6	116.6	116.5	116.5	116.5
150	116.5	116.5	116.5	116.5	116.5	116.5	116.4	116.4	116.4	116.4
160	116.4	116.4	116.4	116.4	116.4	116.4	116.4	116.3	116.3	116.3
170	116.3	116.3	116.3	116.3	116.3	116.3	116.3	116.3	116.3	116.3
180	116.3	116.2	116.2	116.2	116.2	116.2	116.2	116.2	116.2	116.2
190	116.2	116.2	116.2	116.2	116.2	116.2	116.2	116.1	116.1	116.1
200	116.1									

Dmax WT. 1.5%: 2.590

Dmax rel: 2.5844

10 - 7.95%
 20 - 6.00%
 40 - 4.20%
 60 - 3.28%
 80 - 2.68%
 100 - 2.27%
 120 - 1.93%
 150 - 1.60%
 200 - 1.23%

80-100

Poutres	M sec	Meau	M sss	T*	corr.	D brute	D max	% comp	Hauteur	Largeur
A1										
A2										
B1										
B2										
C1	3 141,9	1 875,4	3 143,7	19,8	1,001203	2,480	2,584	96,0	51,94	63,67
C2	3 080,1	1 842,3	3 082,1	19,8	1,001203	2,487	2,584	96,3	51,09	63,10
D1	3 208,4	1 903,7	3 211,0	19,8	1,001203	2,457	2,584	95,1	52,58	65,27
D2	3 052,8	1 802,2	3 054,9	19,8	1,001203	2,440	2,584	94,4	51,01	64,43
E1	3 147,9	1 872,2	3 149,8	19,8	1,001203	2,467	2,584	95,5	51,13	64,28
E2	3 174,8	1 898,9	3 176,8	19,8	1,001203	2,487	2,584	96,3	51,29	64,49
F1	2 994,3	1 780,9	2 996,4	20,0	1,001162	2,466	2,584	95,4	50,11	63,61
F2	3 079,9	1 836,8	3 081,9	20,0	1,001162	2,476	2,584	95,8	52,00	62,96
G1	3 074,2	1 818,9	3 076,1	20,6	1,001037	2,448	2,584	94,7	51,40	63,95
G2	3 142,5	1 872,7	3 144,8	20,6	1,001037	2,473	2,584	95,7	52,07	64,27
H1	3 007,8	1 789,1	3 009,1	21,3	1,000884	2,468	2,584	95,5	50,32	63,37
H2	3 030,2	1 807,3	3 031,3	21,3	1,000884	2,478	2,584	95,9	50,54	63,38
Moyenne								95,5	51,3	63,9
Écart type								0,571	0,754	0,673

MG-90

Poutres	M sec	Meau	M sss	T*	corr.	D brute	D max	% comp	Hauteur	Largeur
A1	3 169,8	1 895,9	3 171,8	23,1	1,000471	2,466	2,584	96,2	51,56	63,49
A2	3 078,0	1 829,4	3 079,3	23,1	1,000471	2,464	2,584	95,3	50,69	64,33
B1	3 115,9	1 851,9	3 118,2	22,6	1,000589	2,462	2,584	95,3	51,15	63,25
B2	3 110,8	1 859,8	3 113,2	22,6	1,000589	2,483	2,584	96,1	50,60	64,28
C1	3 084,0	1 831,5	3 087,2	22,1	1,000705	2,458	2,584	95,1	50,46	64,08
C2	3 158,3	1 836,1	3 161,5	22,1	1,000705	2,385	2,584	92,3	51,96	64,19
D1	3 020,5	1 793,6	3 023,2	21,6	1,000818	2,458	2,584	95,1	50,13	63,10
D2	3 078,2	1 835,2	3 080,7	21,6	1,000818	2,473	2,584	95,7	50,81	64,20
E1	3 082,0	1 828,8	3 085,4	21,0	1,000950	2,455	2,584	95,0	50,95	63,64
E2	3 167,1	1 885,2	3 169,9	21,0	1,000950	2,468	2,584	95,5	51,40	65,16
F1	3 084,2	1 820,3	3 086,9	20,8	1,000993	2,437	2,584	94,3	51,61	64,09
F2	3 044,4	1 805,6	3 046,9	20,8	1,000993	2,455	2,584	95,0	51,07	63,63
G1	3 053,3	1 815,8	3 055,6	20,6	1,001037	2,465	2,584	95,4	51,31	63,85
G2	3 076,0	1 844,0	3 078,2	20,6	1,001037	2,495	2,584	96,6	50,89	63,65
H1	3 120,4	1 861,3	3 123,1	20,5	1,001058	2,476	2,584	95,8	52,46	63,39
H2	3 097,0	1 840,9	3 099,7	20,5	1,001058	2,463	2,584	95,3	51,59	63,55
I1	3 037,8	1 797,5	3 040,6	20,2	1,001121	2,446	2,584	94,7	51,29	63,58
I2	3 067,1	1 828,3	3 070,0	20,2	1,001121	2,473	2,584	95,7	51,85	62,91
Moyenne								95,2	51,2	63,8
Écart type								0,916	0,601	0,536

150-200

Poutres	M sec	Meau	M sss	T*	corr.	D brute	D max	% comp	Hauteur	Largeur
A1	3 217,0	1 916,1	3 218,9	20,0	1,001162	2,472	2,584	95,7	52,15	65,20
A2	3 115,3	1 857,2	3 117,1	20,0	1,001162	2,476	2,584	95,8	51,39	64,66
B1	3 150,3	1 873,2	3 152,0	20,0	1,001162	2,466	2,584	95,4	52,21	64,32
B2	3 135,1	1 868,4	3 137,0	20,0	1,001162	2,474	2,584	95,7	51,25	65,27
C1	3 152,0	1 872,5	3 154,2	20,0	1,001162	2,462	2,584	95,3	51,34	64,99
C2	3 162,9	1 890,6	3 164,7	20,0	1,001162	2,485	2,584	96,2	51,51	65,36
D1	3 128,4	1 857,1	3 130,4	20,0	1,001162	2,460	2,584	95,2	51,56	64,52
D2	3 153,1	1 876,7	3 155,3	20,0	1,001162	2,469	2,584	95,5	52,19	64,12
E1	3 050,6	1 814,3	3 052,6	20,7	1,001015	2,466	2,584	95,4	51,22	63,36
E2	3 083,3	1 837,0	3 085,5	20,7	1,001015	2,472	2,584	95,7	51,07	64,22
F1	3 047,4	1 821,4	3 049,5	20,7	1,001015	2,484	2,584	96,1	50,61	63,70
F2	3 093,5	1 837,7	3 095,8	20,7	1,001015	2,461	2,584	95,3	51,29	64,34
G1	3 011,3	1 784,1	3 013,0	20,8	1,000993	2,453	2,584	94,9	51,12	63,18
G2	3 062,0	1 823,3	3 064,0	20,8	1,000993	2,470	2,584	95,6	51,14	64,14
H1	3 077,5	1 823,6	3 079,1	20,8	1,000993	2,454	2,584	95,0	51,52	63,83
H2	3 016,0	1 794,7	3 017,9	20,8	1,000993	2,468	2,584	95,5	50,83	63,03
Moyenne								95,5	51,4	64,3
Écart type								0,357	0,460	0,728

MG-175

Poutres	M sec	Meau	M sss	T*	corr.	D brute	D max	% comp	Hauteur	Largeur
A1	3 233,8	1 916,4	3 235,4	20,1	1,001142	2,455	2,584	95,0	52,74	65,49
A2	3 290,8	1 964,9	3 292,4	20,1	1,001142	2,482	2,584	96,0	52,83	66,11
B1	3 188,1	1 898,4	3 189,7	20,1	1,001142	2,472	2,584	95,7	51,51	65,52
B2	3 211,8	1 917,9	3 213,6	20,1	1,001142	2,482	2,584	96,0	52,23	64,83
C1	3 309,3	1 982,6	3 311,3	20,1	1,001142	2,493	2,584	96,5	52,62	66,04
C2	3 117,9	1 857,9	3 119,3	20,1	1,001142	2,475	2,584	95,8	50,95	64,94
D1	3 239,9	1 939,9	3 241,5	20,1	1,001142	2,492	2,584	96,4	52,38	64,84
D2	3 247,8	1 952,2	3 249,5	20,1	1,001142	2,506	2,584	97,0	52,14	65,72
E1	3 082,4	1 840,5	3 084,5	19,8	1,001203	2,481	2,584	96,0	51,01	63,60
E2	3 122,3	1 849,8	3 124,4	19,8	1,001203	2,453	2,584	94,9	51,65	64,58
F1	3 097,7	1 850,6	3 099,7	19,8	1,001203	2,483	2,584	96,1	50,95	64,09
F2	3 121,6	1 850,6	3 123,7	19,8	1,001203	2,455	2,584	95,0	51,83	64,37
G1	3 064,8	1 813,9	3 066,8	19,8	1,001203	2,449	2,584	94,8	51,34	64,04
G2	3 127,0	1 864,0	3 129,6	19,8	1,001203	2,474	2,584	95,7	51,58	64,36
H1	3 079,0	1 834,1	3 080,8	19,8	1,001203	2,473	2,584	95,7	51,75	63,29
H2	3 088,8	1 824,2	3 090,7	19,8	1,001203	2,442	2,584	94,5	51,88	64,14
Moyenne								95,7	51,8	64,7
Écart type								0,695	0,617	0,848

ANNEXE VII

**Procédure pour la caractérisation de la rigidité, de l'angle de phase
et de la résistance à la fatigue des enrobés.**

PROCÉDURE POUR LA CARACTÉRISATION DE LA RIGIDITÉ, DE L'ANGLE DE PHASE ET DE LA RÉSISTANCE À LA FATIGUE DES ENROBÉS

Cette procédure décrit l'approche retenue pour caractériser la rigidité, l'angle de phase et la résistance à la fatigue d'un enrobé. Les deux premiers aspects sont étudiés par le biais d'un essai de balayage de fréquence alors que la résistance à la fatigue est caractérisée à deux niveaux de déformation imposée. De même, la méthode de fabrication des poutres est également présentée.

La procédure proposée ne prétend pas être la meilleure approche envisageable. Elle constitue une approche acceptable tenant compte des conditions qui prévalent dans le laboratoire. Il est possible de la modifier en fonction des informations et de la précision recherchées.

1. Préparation des poutres

- a) Préparer quatre plaques d'enrobé de 500×180×100 mm à l'aide du compacteur de plaque de type LCPC selon la norme française NF P 98-250-2 « Préparation de mélanges hydrocarbonés Partie 2 : Compactage des plaques »;
- b) Viser une compacité minimale de 92% au centre de la plaque;
- c) Découper deux poutres de 380 × 63 × 50 mm au centre de chaque plaque selon le plan de découpage de la figure 1;
- d) Mesurer la largeur et la hauteur de la poutre en son centre en prenant soin de mesurer chaque face;
- e) Déterminer la densité brute de chaque poutre selon la norme LC 26-040 «Détermination de la densité brute et de la masse volumique des enrobés à chaud compactés» et diviser la valeur obtenue par la densité maximale de l'enrobé déterminée selon la norme LC 26-045 « Détermination de la densité maximale » de manière à obtenir la compacité selon l'équation (1);

$$\% \text{ compacité} = 100 \times (D_b/D_m); \quad (1)$$

D_b = densité brute

D_m = densité maximale

- f) Localiser le centre de la poutre en hauteur et en longueur. À cet endroit fixer à l'aide de colle époxy le butoir permettant de suivre le déplacement de la poutre lors de l'essai. Laisser durcir la colle.

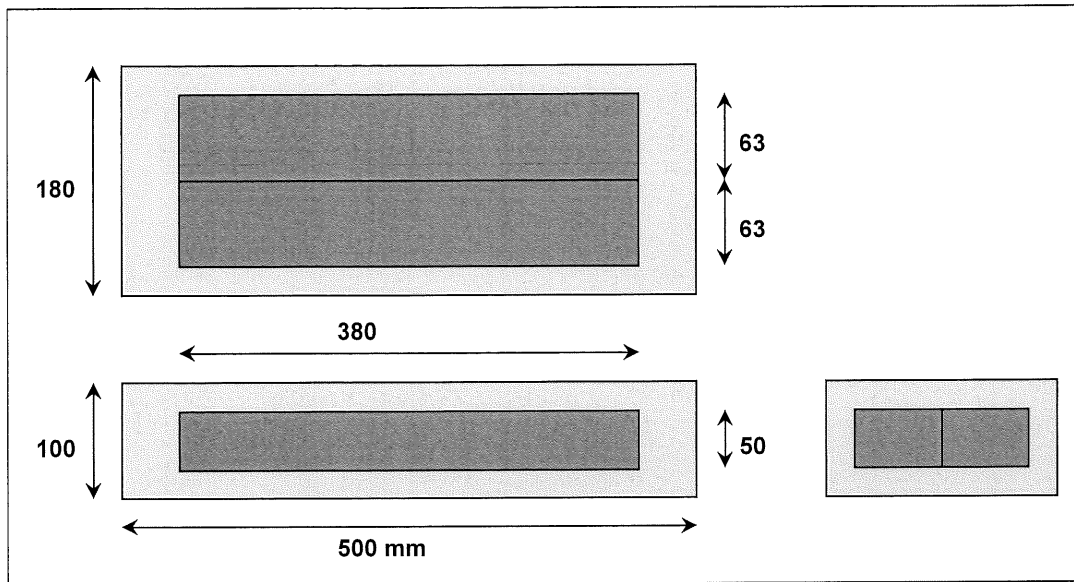


Figure 1 – Plan de découpage des poutres

2. Balayage de fréquence

a) Contexte

Cette procédure vise à caractériser la rigidité et l'angle de phase d'un enrobé à différentes températures et fréquences. Trois poutres sont nécessaires pour effectuer cette procédure. Les poutres peuvent être conservées pour effectuer la caractérisation de fatigue puisque les essais effectués ne sont pas destructifs.

b) Paramètres d'essai

Température \Rightarrow 5, 15 et 25°C;
 Fréquence \Rightarrow 1, 3, 10 et 30 Hz;
 Déformation en tension (ϵ) \Rightarrow 50 $\mu\text{m}/\text{m}$;
 Durée \Rightarrow 1 minute

c) Essais

- i) Conditionner les poutres à la température désirée deux heures avant le début de l'essai;
- ii) Effectuer l'essai de balayage de fréquence dans l'ordre suivant : 30, 10, 3 et 1 Hz sur les trois poutres;
- iii) Refaire cette procédure pour chaque température dans l'ordre suivant : 5, 15 et 25 °C.

d) Analyse des résultats

- i) Calculer la rigidité de l'enrobé selon l'équation (2);
- ii) Calculer l'angle de phase de l'enrobé selon l'équation (5);
- iii) Tracer les courbes isothermes selon les modèles présentés aux figures 2 et 3.

$$E = \sigma/\epsilon$$

(2)

E : rigidité (kPa)

σ : contrainte en tension (kPa)

ε : déformation en tension (m/m)

$$\sigma = (PL)/(bh^2) \quad (3)$$

σ : contrainte en tension (kPa)

P : charge appliquée (kN)

L : distance entre les mâchoires extérieures (m)

b : largeur de la poutre (m)

h : hauteur de la poutre (m)

$$\varepsilon = (12\delta h)/(3L^2 - 4a^2) \quad (4)$$

ε : déformation en tension (m/m)

δ : déflection au centre de la poutre (m)

h : hauteur de la poutre (m)

L : distance entre les mâchoires extérieures (m)

a : distance entre les mâchoires intérieures (m)

$$\phi = 360^\circ (t_\Delta/t_{\text{total}}) \quad (5)$$

ϕ : angle de phase ($^\circ$)

t_Δ : décalage entre la charge maximale et la déflection maximale (s)

t_{total} : temps nécessaire pour effectuer un cycle de chargement (s)

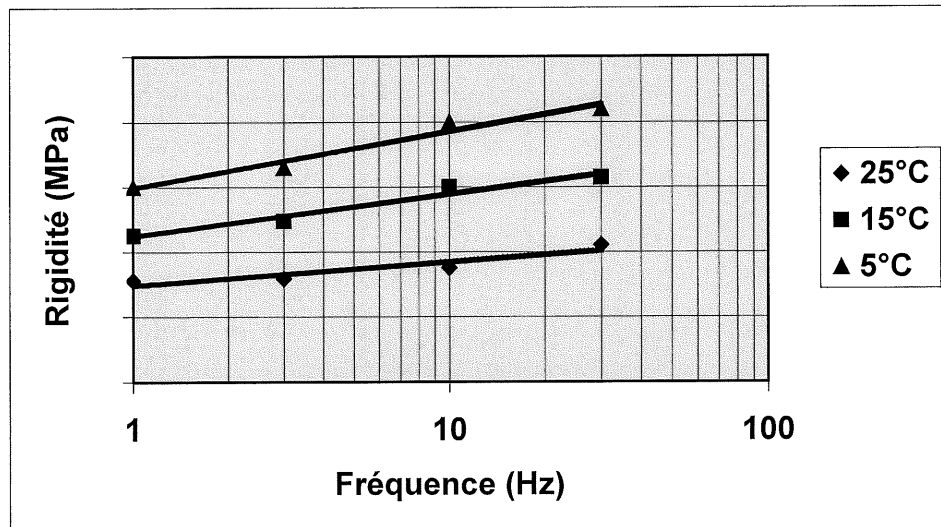


Figure 2 – Isothermes de rigidité

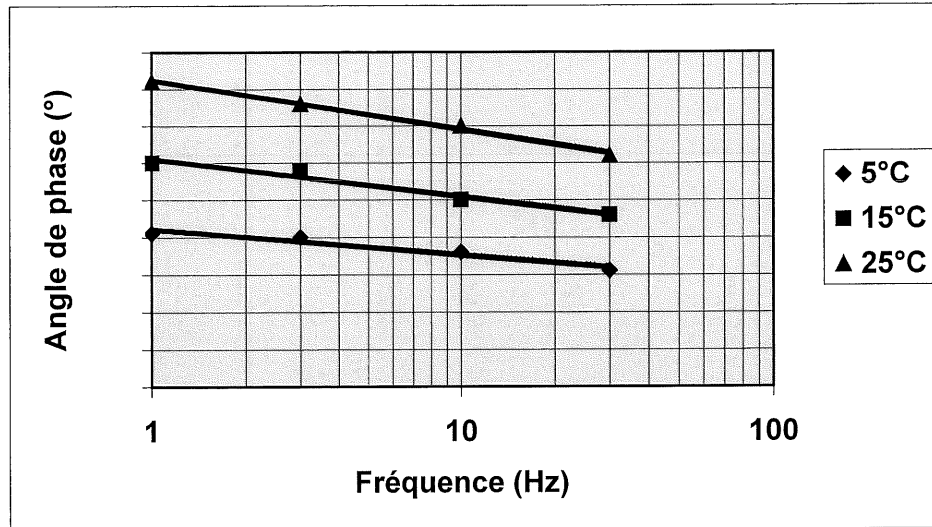


Figure 3 – Isothermes d'angle de phase

3. Résistance à la fatigue

a) Contexte

Cette procédure consiste à caractériser la résistance à la fatigue d'un enrobé pour une température et une fréquence unique. Huit poutres sont nécessaires pour effectuer cette procédure. La caractérisation est effectuée en imposant une déformation constante jusqu'à la rupture de l'enrobé. La rupture est atteinte lorsque l'enrobé a perdu la moitié de sa rigidité initiale mesurée à 50 cycles.

b) Paramètres d'essai

Température $\Rightarrow 15^{\circ}\text{C}$;
Fréquence $\Rightarrow 10\text{ Hz}$.

c) Essais

- i) Conditionner les poutres à la température désirée deux heures avant le début de l'essai;
- ii) Effectuer un premier essai en imposant une déformation de $800\text{ }\mu\text{m/m}$;
- iii) Effectuer un second essai en imposant une déformation estimée permettant d'atteindre la rupture à environ 50 000 cycles;
- iv) Basé sur les résultats obtenus lors des deux premiers essais, estimer la déformation nécessaire pour atteindre la rupture à 50 000 cycles. Effectuer trois essais en imposant cette déformation;
- v) Estimer la déformation nécessaire pour atteindre la rupture à 500 000 cycles et effectuer trois essais avec cette déformation.

d) Analyse des résultats

- i) Calculer la relation de résistance à la fatigue selon l'équation (6) ou (7);

$$\log N = a \log \varepsilon + b \quad (6)$$

$$N = 10^b \varepsilon^a \quad (7)$$

N : nombre de cycles à la rupture

ε : déformation en tension ($\mu\text{m}/\text{m}$)

- ii) Tracer la relation de résistance à la fatigue obtenue dans un plan bilogarithmique selon le modèle présenté à la figure 4.

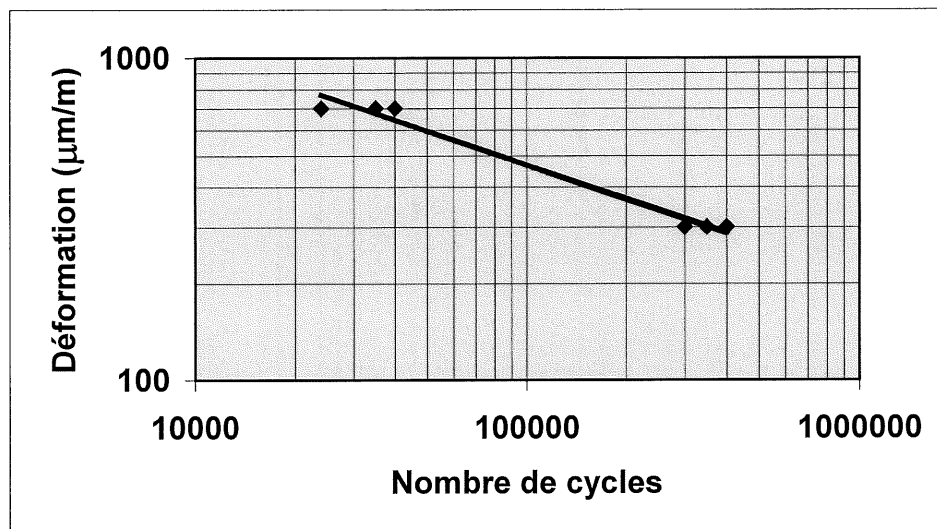


Figure 4 – Droite de fatigue